Ugo Bardi

Antes del colapso

Una guía para el otro lado del crecimiento

Prólogo de
Jorge Riechmann







Ugo Bardi

Antes del colapso

Una guía para el otro lado del crecimiento

Prólogo de
Jorge Riechmann







Ugo Bardi

Antes del colapso

UNA GUÍA PARA EL OTRO LADO DEL CRECIMIENTO

Prólogo de Jorge Riechmann Traducción de Rocío López Ruiz



SERIE DESARROLLO Y COOPERACIÓN

DIRIGIDA POR ESTEBAN SÁNCHEZ MORENO



TRADUCIDO POR ROCÍO LÓPEZ RUIZ

DISEÑO DE CUBIERTA: PABLO NANCLARES

FIRST PUBLISHED IN ENGLISH UNDER THE TITLE

BEFORE THE COLLAPSE; A GUIDE TO THE OTHER SIDE OF GROWTH BY UGO BARDI, EDITION: 1

FUENCARRAL, 70
28004 MADRID
TEL. 91 532 20 77
WWW.CATARATA.ORG

 DONOSO CORTÉS, 63
28015 MADRID TEL. 91 394 64 09 IUDCUCM@UCM.ES

ANTES DEL COLAPSO.UNA GUÍA PARA EL OTRO LADO DEL CRECIMIENTO

ISBNE: 978-84-1352-514-3
ISBN: 978-84-1352-519-8
DEPÓSITO LEGAL: M-18.319-2022

THEMA: RNPG/KCX/RNT

Dedicado a mis dos nietas, Aurora y Beatrice, que nacieron mientras se escribía este libro y que vivirán en el futuro que hoy solo podemos percibir vagamente.

COLAPSAR MEJOR (NOTAS ACERCA DE UN LIBRO OPTIMISTA SOBRE COLAPSOS)

1

En plena ola de calor de junio de 2022, el antropólogo francés Sylvain Perdigon recordaba cómo en 2014 una "mujer del tiempo" de la televisión francesa presentó el hipotético pronóstico meteorológico para el 18 de agosto de 2050 como parte de una campaña para alertar sobre la realidad del cambio climático. Ahora su pronóstico de temperaturas extremas para ese día lejano se había convertido en el pronóstico real para mediados de junio de 2022[1].

En lo que se refiere a la crisis ecosocial y la tragedia climática, todo está yendo sistemáticamente *worse than expected* (peor que lo esperado), como nos suele recordar Ferran Puig Vilar. Por ejemplo, los daños que las y los climatólogos esperaban que se hicieran visibles a mediados del siglo XXI ya están aquí con nosotros.

"La humanidad parece estar empeñada en jugar una partida mortal de ruleta rusa donde el clima de la Tierra es un arma cargada", escribe en este libro el profesor Ugo Bardi.

2

Estamos viviendo un fin de mundo.

No el fin del mundo: la Madre Tierra seguirá ahí. Los niveles básicos de la vida en Gaia[2] —bacterias, arqueas, hongos, algas, líquenes, muchas clases de plantas— son extraordinariamente resistentes. Pero el mundo tal y como lo hemos conocido —la Tierra familiar y fácilmente habitable del Holoceno— se deshace ante nuestros ojos, y los desesperados esfuerzos de mucha gente por aferrarse a aquella normalidad conocida —y ya del todo

irrecuperable— no alivian nuestra situación, sino que la agravan.

No se trata del fin del mundo —no es la muerte de Gaia, no es el final de la vida en el planeta Tierra— pero sí *el fin de nuestro mundo*. ¿Qué hace uno en una situación así?

3

Por ejemplo, leer a Ugo Bardi. Las personas cercanas a Los Libros de la Catarata ya conocen al profesor florentino: fue una excelente idea traducir y publicar en 2014 su libro *Los límites del crecimiento retomados*, un minucioso y clarividente análisis de aquel importantísimo libro de 1972 *The Limits to Growth*, el primero de los informes al Club de Roma. Ahora que se cumplen cincuenta años de la publicación de aquella obra pionera (en la modelización del sistema mundial merced a la dinámica de sistemas), que nos permitió comprender la tendencia a la extralimitación (*overshoot*) seguida del colapso que caracteriza a las sociedades industriales, es un buen momento para recuperar aquel primer libro de Bardi en castellano, y sería un excelente acompañamiento para este que tienes ahora entre las manos, apreciada lectora, curioso lector[3].

4

Ugo Bardi, teórico de sistemas complejos (aquellos sistemas que exhiben efectos de realimentación fuertes, define en cierto momento de este libro)[4], lleva más de un decenio reflexionando sobre el *efecto Séneca* a partir de una primera intuición en 2011[5]; en la primavera de 2017 publicó *The Seneca Effect: Why Growth is Slow but Collapse is Rapid* (Springer, 2017); después, en 2020, *Before the Collapse*, este segundo libro sobre el *efecto Séneca* que ahora se traduce al castellano. Si hubiera que llamar a alguien *colapsólogo* en sentido propio, por su empeño en una comprensión lo más objetiva y racional posible de esta clase de fenómenos, sería al profesor Bardi, del Departamento de Química de la Universidad de Florencia.

La interconexión fuerte entre los subsistemas de un sistema complejo

puede llevar a que como resultado del impacto de una perturbación sobre uno o algunos de esos nodos o subsistemas, la red entera colapse. Así, el desarrollo de los sistemas complejos responde a menudo a lo que el profesor Bardi denomina el *modo Séneca*: se trata de un proceso asimétrico, donde el crecimiento es lento y el declive muy acentuado. La catástrofe llega mucho antes de lo que nuestra intuición esperaría y tiende a pillarnos desprevenidos.

También tendrán ustedes trato, en estas páginas, con *precipicios de Séneca*, *cuellos de botella de Séneca* y *rebotes de Séneca*: el filósofo cordobés da mucho juego en manos del físico-químico florentino.

5

Si en un libro aparece la palabra *overshoot* ya en el prefacio, como sucede aquí, tenemos un indicio de que probablemente va a hablar de cosas esenciales.

Y hablando de extralimitación ecológica seguida de colapso, me permito aquí señalar lo que me parece una contradicción interna entre las explicaciones que va proponiendo nuestro autor. En cierto momento defiende que "si las élites estadounidenses han decidido que no hay esperanza de salvar a todo el mundo, lo lógico es que pasen al 'modo trampa' y dejen que la mayoría de la gente muera": por esa razón, Donald Trump y el Partido Republicano son negacionistas climáticos. No es que ignoren la realidad de los hechos biofísicos básicos, sino que aceptan un genocidio a gran escala del que las élites se salvarán. No obstante, en un momento posterior, el profesor florentino sugiere otra cosa: "Nadie parece entender que el problema, hoy en día, no es el de ampliar las fronteras de su país, sino el de asegurar la supervivencia física de sus ciudadanos frente a acontecimientos potencialmente desastrosos relacionados con el cambio climático y el colapso del ecosistema". ¿En qué quedamos: élites ignorantes o élites genocidas?

6

Bardi insiste muchas veces en que "el colapso no es un error, es un rasgo característico" de los sistemas complejos en el universo que habitamos (p. 63). Si bien no podemos evitar muchos colapsos (y todo sistema complejo colapsará si transcurre el tiempo suficiente), sí podemos al menos tratar de prepararnos para ellos y colapsar mejor. *Before the Collapse* (título que sugiere un doble significado: *antes del colapso*, sí, pero también *haciendo frente al colapso*) es una buena guía para esa singladura, y se agradecen los frecuentes toques de humor con que el autor desdramatiza su materia de estudio, en sí misma —no hace falta insistir sobre ello— muy dramática. Junto al humor, la contextualización amplia (en última instancia, en un contexto cósmico y de Big History) es otro recurso que ayuda a desdramatizar.

7

Algo muy atractivo en el profesor Bardi es su apetito interdisciplinar. Apetito que finalmente se plasma en una muy amplia cultura, no solo sobre asuntos de química y física, sino también sobre materias humanísticas (con énfasis especial en la historia): su trabajo ofrece muchos materiales para aquella *Tercera Cultura* (tendiendo puentes entre ciencias naturales, ciencias sociales y humanidades) que nos pedía Francisco Fernández Buey[6].

8

El colapso no es un fallo de los sistemas complejos, insiste el profesor florentino, sino un rasgo de su modo de funcionar: el universo es así. ¿Sería esta una posición pesimista? ¡Pero si está prohibido el pesimismo en nuestras filas! Si uno no manifiesta al menos un *optimismo de la voluntad* suficientemente musculado, se arriesga a severas reprimendas.

Pues bien: contra el optimismo obligatorio al que quisieran someternos tantos prescriptores a diestra y siniestra (porque el pesimismo, suele decirse, desmoviliza y funciona como una profecía que se autocumple), el esfuerzo racional de Bardi por comprender las dinámicas de colapso es

muy de agradecer. (Confieso que, una vez agotado desastrosamente el ciclo de movilización emancipatoria del 15-M, escuchar el adjetivo "ilusionante" en contextos de debate político me revuelve las tripas, más que levantarme el ánimo.) Y para quienes prefieren no pensar en ningún tipo de colapso sin santiguarse ya tienen ustedes a la energética y contraapocalíptica Rosi Braidotti, o al más cercano Zamora Bonilla[7].

9

Bardi es un colapsólogo muy optimista. Cualquiera que haya seguido su implicación en los debates sobre transiciones energéticas a lo largo del decenio último lo sabe. Ese optimismo se manifiesta por ejemplo en un artículo como "The Sower's Way: a strategy to attain the energy transition"[8], su particular parábola del sembrador también evocada en este libro, pleno de confianza en la posibilidad técnica de una transición sin demasiados tropiezos a las fuentes de energía renovable. Sin embargo, su realismo sociopolítico le lleva a atemperar ese optimismo tecnológico: sería posible esa transición, sí, pero resulta extremadamente improbable a juzgar por el curso político que siguen nuestras sociedades.

Se atribuye al director de la CIA y ministro de Defensa estadounidense James Schlesinger una observación que Bardi recoge varias veces en este libro: los seres humanos solo tendríamos dos modos de operar, la autocomplacencia y el pánico. Para desmentirlo, sería necesario que nuestros procesos de reflexión y deliberación nos permitiesen prepararnos de verdad (a escala socialmente significativa) para un futuro cuya configuración nunca conoceremos, pero cuya estructura de colapso ecosocial resulta hoy muy discernible. Todo el esfuerzo desplegado en esta obra trata de proporcionarnos herramientas intelectuales para esa tarea.

10

Junto con la historia de la emperatriz romana Gala Placidia, el Japón del periodo Edo es un segundo gran ejemplo histórico positivo del que se puede aprender a la hora de pensar transiciones hacia la sustentabilidad. "Lo que nos cuenta la historia del Japón de Edo coincide con lo que sabemos

sobre los sistemas complejos: tienden a la estabilidad. En otras palabras, nuestra actual fijación en el crecimiento puede ser solo un capricho de la historia destinado a desaparecer en el futuro cuando nos veamos obligados a vivir dentro de los límites del ecosistema de la Tierra". Sin embargo, advierte Bardi en 2020 con palabras que adquieren una resonancia sombría en 2022, "hay una condición que necesitamos urgentemente para ello: la *paz*, como nos dice la experiencia de Edo". Lejos de progresar una pacificación de las relaciones internacionales que nos permitiera hacer frente a los procesos de colapso ecosocial en curso, el 24 de febrero de 2022 la invasión de Ucrania por Rusia ha acelerado una militarización generalizada que nos precipita en dirección contraria a donde necesitaríamos movernos.

En estos tiempos aciagos, *El País* editorializa con exaltación sobre la Unión Europea como "nueva potencia geopolítica" (1 de marzo de 2022). David Rieff, en la página de al lado, también subraya que "Europa está entrando en una nueva época de poder duro". Donde necesitaríamos Gaia-política y un nivel inédito de cooperación internacional, se profundiza la vieja geopolítica de competencia destructiva entre los Estados-nación y los bloques que van configurando: un mundo de "Imperios Combatientes" (Rafael Poch de Feliu)[9]. Y el marco general es un ecocidio que incluye en su seno toda clase de promesas de genocidio.

El mundo ya muy malo que teníamos se está transformando, ante nuestros ojos abiertos como platos, en otro mucho peor. "Nunca se hubiera tenido que llegar a esto" podría ser la respuesta a casi todo lo que nos va sucediendo. Pero ya estamos ahí, y desde ahí es donde nos toca actuar ahora… Recordando, por ejemplo, estos versos de Brecht:

> Cuando empiece la guerra/ vuestros hermanos puede que se transformen/ y que sus caras no sean ya reconocibles./ Pero vosotros debéis seguir igual.// Irán a la guerra, no/ como a una carnicería, sino/ como a un trabajo serio. Todo/ lo habrán olvidado. Pero vosotros/ no debéis olvidar nada.// Os echarán aguardiente en el gaznate/ como a los demás. Pero vosotros/ debéis permanecer sobrios[10].

11

Teniendo en cuenta todo el juego que ha dado el llamado *senequismo*

español en la historia de las ideas en nuestro país (con aportaciones sobresalientes como las de Ángel Ganivet o María Zambrano), y cómo en algunos momentos el filósofo estoico romano nacido en Córdoba ha llegado a encarnar al sabio por antonomasia en el imaginario popular español (de tal manera que se usa la expresión "es un Séneca" para alabar la sabiduría de alguien), no está mal que el hilo conductor de la reflexión de Bardi sea precisamente un pensamiento del filósofo cordobés. A saber, aquello que dijo Séneca acerca del colapso en una de sus cartas a Lucilio: "Consuelo sería para nuestra debilidad que las cosas pudiesen restablecerse tan pronto como quedan destruidas; pero sucede lo contrario: el desarrollo es lento y rápida la ruina"[11].

Colapsaremos, pero podríamos colapsar mejor. Bardi esboza una *estrategia de Séneca* que puede ayudarnos en ello: aceptar que el cambio es necesario y que, en muchos casos, oponernos al mismo lleva a un derrumbe más rápido. Aceptar lo inevitable nos permitirá prepararnos para colapsar mejor (y quizá incluso evitar el colapso): "La estrategia de Séneca consiste en no oponerse a la tendencia del sistema a ir en una determinada dirección, sino en dirigirlo de tal manera que el colapso no tenga que producirse. La clave de la estrategia es evitar que el sistema acumule tanta tensión que luego se vea obligado a descargarla de forma brusca". Hacia el final del libro se sugiere una noción de *ecoestoicismo*[12], justo antes de rememorar la estimulante y novelesca historia de Gala Placidia, la última emperatriz romana.

12

Escribió también Séneca: "Vive cada día como si un día fuera toda tu vida". No es mal consejo para tiempos tan difíciles como los nuestros. De Bardi también podemos decir: ¡este tío es un Séneca!

JORGE RIECHMANN *Cercedilla, 4 de julio de 2022*

NOTAS

1 . Tuit del 15 de junio de 2022, https://twitter.com/sylvaindarwish/status/1537181101357256704.

2 . Cabe recordar aquí que Ugo Bardi es uno de los científicos defensores de la teoría Gaia: véase, por ejemplo, su ensayo "Gaia exists! Here is the proof" en el blog *Cassandra's Legacy*, 4 de agosto de 2019; https://cassandralegacy.blogspot.com/2019/08/gaia-exists-here-is-proof.html . Para su idea de Gaia como holobionte, véase, por ejemplo, https://cassandralegacy.blogspot.com/2020/06/gaia-is-one-of-us-onward-fellow.html.
Bardi, cuya efervescencia intelectual nos alegra y a veces apabulla un poco, inició hace poco un nuevo y estimulante blog sobre *Holobiontes orgullosos*, véase https://theproudholobionts.blogspot.com/ 2022/06/survival-of-fittest-or-non-survival-of.html. El texto de presentación de ese blog reza así: "Todos somos holobiontes: grupos de organismos que se ayudan unos a otros. Como seres humanos, no podríamos sobrevivir sin los microorganismos que pueblan nuestro cuerpo. Pero todas las criaturas vivientes de la Tierra son holobiontes, y el ecosistema en sí es un holobionte gigante (al que algunos llaman 'Gaia'). El concepto de holobionte también se puede usar para estructuras no bióticas reales y virtuales, empresas, estados, ideas, e ideologías, así como el comportamiento de las ideas ('memes') en la World Wide Web. El término *holobionte* fue difundido por Lynn Margulis en 1991. Ella fue también codesarrolladora del concepto de Gaia".

3. Bardi rememora una parte de su análisis sobre *The Limits to Growth* en el primer capítulo de este libro, "La ciencia de la perdición: modelar el futuro".
Permítaseme una pequeña digresión. El negacionismo de los límites biofísicos que prevalece en la cultura dominante puede estudiarse bien a través de dos casos ejemplares: lo que cabe llamar el "*affaire* Georgescu Roegen" y después el "asunto *The Limits to Growth*" en los años setenta (respecto al primero, véase nuestro libro *Bioeconomía para el siglo XXI. Actualidad de Nicholas Georgescu-Roegen*, editado por José Manuel Naredo, Luis Arenas y Jorge Riechmann en Los Libros de la Catarata, Madrid 2022). Y luego, a partir de los años noventa, impresiona el rechazo a hacer frente al calentamiento global, sobre el que nos ilustra espectacularmente el "caso Nordhaus". A William Nordhaus, uno de los economistas más beligerantes contra *The Limits to Growth a partir de 1972*, le concedieron el llamado "premio Nobel" de economía en 2018. En su discurso de aceptación en Estocolmo, este economista neoclásico sugirió que la "política óptima" para abordar el cambio climático daría como resultado un "calentamiento global aceptable" de aproximadamente ¡3 °C para 2100 y 4 °C en 2150! Las y los climatólogos (y científicos de otras disciplinas), a diferencia de los economistas neoclásicos (quienes por desgracia han llegado a dominar en su disciplina, *cancelando* a los rivales que defendían teorías económicas más razonables), consideran que un calentamiento global de esta magnitud sería catastrófico (probablemente incompatible con la mera supervivencia de la especie humana). Esta es la locura del BAU (*bisnes comodecostumbre*)…

4. "Un sistema es complejo si, y solo si, muestra fuertes efectos de retroalimentación. Todos los días nos enfrentamos a sistemas complejos: animales, personas, organizaciones, etc. No es difícil entender qué es complejo y qué no lo es: depende de si la reacción a las perturbaciones externas está dominada por la retroalimentación o no. Pensemos en una roca comparada con un

gato…”.

5 . Véase su blog https://thesenecaeffect.blogspot.com/.

6 . Francisco Fernández Buey, *Para la Tercera Cultura* (edición de Salvador López Arnal y Jordi Mir), El Viejo Topo, Barcelona, 2013.

7 . Buen comentario en Asier Arias, "¿Quiénes son los contraapocalípticos?", en el recopilatorio artesanal de textos de la revista digital *15-15-15*, nº -8 ½, primavera de 2022, pp. 69-77. También, en https://www.15-15-15.org/webzine/2021/09/11/quienes-son-los-contra-apocalipticos/.

8 . Ugo Bardi, Ilaria Perissi, Denes Csala y Sgouris Sgouridis, "The Sower's way: a strategy to attain the energy transition", *International Journal of Heat and Technology*, vol. 34, nº especial 2, octubre de 2016, https://bit.ly/3nBhtAa.

9 . Véase, por ejemplo, Rafael Poch, "Lo que nos van explicando sobre la guerra", *CTXT*, 1 de mayo de 2022, https://bit.ly/3agjlLy.

10 . Bertolt Brecht, *Más de cien poemas*. Hiperión, Madrid 2005, p. 211.

11 . Doy la traducción de Francisco Navarro, *Epístolas morales* de Séneca, Madrid, 1884, p. 370.

12 . Podríamos hablar de un *ecoestocismo taoísta* que se articula en pasos como este: "Como todos los seres humanos, los estoicos tenían sus límites, pero creo que Séneca y otros como Epicteto y Marco Aurelio comprendieron un punto fundamental que la mayoría de sus contemporáneos olvidaron, al igual que nosotros lo olvidamos a menudo. Se trata de que los sistemas complejos se manejan mejor 'siguiéndoles la corriente' en lugar de intentar forzarlos a tomar la forma que queremos. Esto, en realidad, puede empeorar las cosas, como nos dijo otro filósofo de los tiempos modernos, Jay Forrester, cuando habló de 'empujar las palancas en la dirección equivocada'".

PRÓLOGO

Conocí a Ugo Bardi cuando lo entrevisté en Florencia para mi película de 2014 *Breath of Life*. Más recientemente, apareció en mi documental de 2018 *El pasado del futuro* (*Living in the Future's Past*) y en 2019 nos volvimos a encontrar en un castillo medieval en las colinas cercanas a Florencia para una nueva producción. Fue un entorno estimulante para hablar de cómo nuestro futuro se refleja en nuestro pasado. Las conversaciones con Ugo son siempre fascinantes: te descubres a ti misma encontrando paralelismos entre mundos que habrías pensado que eran tan diferentes que carecían de puntos en común. Por ejemplo, Ugo tiene tal amplitud de conocimientos, que puede hablarte de como las antiguas civilizaciones, desde los sumerios en adelante, tenían una gran cantidad de elementos comunes con nuestro mundo. En particular, Ugo se interesa por la comparación de nuestra situación con la de la época que llamamos Antigüedad tardía o Alta Edad Media.

En aquellos tiempos remotos, la gente se enfrentaba a problemas similares a los que tenemos hoy: ¿cómo mantener los logros de lo que llamamos "civilización" en condiciones de reducción de nuestra riqueza material? Según Ugo y su compañera de trabajo, la joven medievalista italiana Alessia Scopece (a quien también conocí en aquel castillo medieval en 2019), la Alta Edad Media estuvo lejos de ser una "edad oscura". Más bien fue un periodo de adaptación creativa a una situación económica difícil. Los habitantes de la Edad Media desarrollaron soluciones flexibles y económicas a problemas irresolubles dentro de los antiguos paradigmas; por ejemplo, para la falta de metales preciosos, desarrollaron métodos culturales de intercambio que sustituyeron a los métodos convencionales. Para Ugo, las reliquias sagradas, tan típicas de la Edad Media, eran, en muchos sentidos, consideradas como "dinero", algo que facilitaba el comercio y los viajes en Europa.

Ugo no solo se interesa por el pasado: proyecta hacia el futuro y sus estudios

sobre la gran transición energética nos dicen si será posible abandonar los combustibles fósiles para construir una sociedad totalmente basada en las energías renovables. Sobre esto me dijo que "obviamente es posible porque es inevitable". El problema no es si llegaremos o no, sino a qué velocidad y con cuánto trabajo y sacrificios. Pero al igual que en la Edad Media fue el destino inevitable del Imperio romano en declive, una sociedad basada en las renovables será el destino inevitable de nuestra civilización en declive.

En este libro, Ugo Bardi destila gran parte de sus pensamientos y sus reflexiones desarrolladas en los últimos años. Comienza por el pasado, a partir de un pensamiento del filósofo romano Lucio Anneo Séneca, que fue quizás el primero en la historia en señalar que la decadencia es siempre más rápida que el pensamiento: "La ruina es rápida", escribió el pensador. A partir de esta sencilla frase, Ugo construye un amplio debate sobre cómo nos encontramos en la situación actual, intentando desesperadamente luchar contra fuerzas que nosotros mismos pusimos en marcha y que ahora somos incapaces de controlar. El cambio climático es el problema paradigmático de nuestra civilización, que puede llevarnos al "precipicio de Séneca", que Ugo describe en este libro.

Sin embargo, este no es un libro pesimista, no es un libro sobre la fatalidad y la oscuridad, y Ugo no está aquí para asustarnos ni para decirnos que no hay esperanza de sobrevivir. Al contrario, es un libro que cobra fuerza y amplitud a partir de la antigua filosofía estoica de la que Séneca era adepto. Los estoicos entendían que el mundo siempre cambia, a veces rápido, y a veces tan rápido que, desde nuestro punto de vista, vemos el cambio como un desastre. Sin embargo, todos los cambios ocurren porque tienen que ocurrir y si vemos grandes cambios en el futuro, será porque son necesarios. De hecho, la línea de conexión que recorre este libro es lo que Ugo llama la "estrategia Séneca": la comprensión de que el cambio es necesario y de que, en la mayoría de los casos, oponerse a él simplemente conduce a una ruina más rápida. Así pues, de los antiguos estoicos podemos obtener la sabiduría que necesitamos para afrontar nuestro incierto futuro.

SUSAN KUCERA
Hawái

PREFACIO

EL EFECTO SÉNECA: POR QUÉ EL CRECIMIENTO ES LENTO, PERO EL COLAPSO ES RÁPIDO

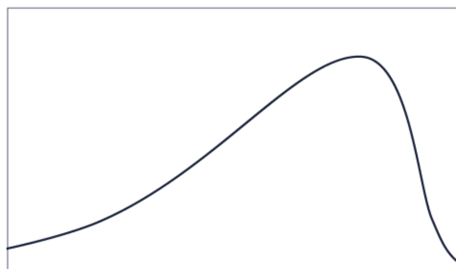
> Sería un consuelo para nuestra debilidad y la de nuestras obras si todas las cosas perecieran con la misma lentitud con la que se formaron; pero tal como son las cosas, los incrementos son de lento crecimiento, pero el camino hacia la ruina es rápido.
>
> Lucio Anneo Séneca, *Cartas a Lucilio*, nº 91

Normalmente, nuestra vida es tranquila. Como personas normales, podemos disfrutar de una prosperidad moderada, de una felicidad razonable y de unos acontecimientos esperados. Pero la vida también está llena de sorpresas y cuando las cosas empiezan a fallar, suelen hacerlo con la suficiente rapidez como para que utilicemos términos como "colapso" o "ruina", como ya señaló hace tiempo el filósofo romano Lucio Anneo Séneca cuando dijo que "los aumentos son de lento crecimiento, pero el camino hacia la ruina es rápido" (Bardi, 2017). Y cuando llega el colapso, a menudo, nos encuentra lamentablemente desprevenidos, por eso debemos prepararnos con antelación (figura 1)

.

FIGURA 1

LA 'CURVA DE SÉNECA' MUESTRA LA EVOLUCIÓN TEMPORAL DE UN SISTEMA. EL CRECIMIENTO ES LENTO, PERO EL DECLIVE ES LO SUFICIENTEMENTE RÁPIDO COMO PARA QUE NOS PAREZCA UN COLAPSO



Puede ser difícil definir los colapsos en términos rigurosos, pero todos podemos reconocer uno cuando lo vemos. El colapso es un declive rápido, incontrolado, inesperado y ruinoso de algo que antes iba bien. Puede atacar a los individuos: puedes perder tu trabajo, enfermar o perder a un amigo cercano o a un familiar. Y puede ocurrir muy rápido, a veces por casualidad,

otras, por un error: pensemos en el caso de Roseanne Barr, que en 2018 vio arruinada su carrera de estrella de la televisión en un día por un solo tuit racista que escribió[1].

El colapso también afecta a sistemas mayores. La vida media de una empresa comercial, hoy en día, es del orden de 15 años, pero las pequeñas empresas tienden a ir y venir mucho más rápido: se trata de la estrategia "falla rápido, falla a menudo", muy conocida en Silicon Valley y supuestamente buena para eliminar a los débiles en la lucha por la supervivencia. Es cierto que una *startup* puede convertirse en un "unicornio", término acuñado por la inversora de riesgo Aileen Lee para describir el raro caso de una *startup* de éxito que alcanza un valor de más de mil millones de dólares. Para estas empresas, e incluso para otras más grandes, la desaparición puede ser un asunto más difícil y doloroso, a veces con posibilidades de volver al negocio, como le ocurrió a Evernote, una superviviente de los primeros tiempos de la web que se niega a desaparecer (Griffith, 2019). Sin embargo, en la mayoría de los casos, cuando una empresa se hunde, lo hace rápidamente, incluso en el caso de empresas que eran consideradas la imagen misma de la solidez. Pensemos en Lehman Brothers, la gran empresa financiera que se hundió en pocos días en el momento de la gran crisis financiera de 2008. Fue entonces cuando descubrimos que no existe una empresa que sea "demasiado grande para fracasar".

Mientras que las empresas van y vienen, economías enteras pueden experimentar colapsos desastrosos y, en ese caso, la recuperación puede llevar mucho tiempo y a veces ni producirse. A lo largo de la historia, los colapsos económicos, a menudo, han acompañado el declive y la desaparición de imperios y civilizaciones enteras. La humanidad también ha visto colapsos abruptos de poblacionales causados por el hambre y la peste, y lo mismo ha ocurrido con la producción de recursos minerales, que ha colapsado regiones enteras, siendo uno de los casos más recientes el de la producción de petróleo del mar del Norte. Hoy en día nos enfrentamos a la terrible posibilidad de la ruina de nuestra civilización y, quizás, de todo el ecosistema de la Tierra. El cambio climático y el agotamiento de los recursos son los dos aspectos de los problemas que se avecinan.

Los colapsos ya son malos de por sí, pero tienen una peculiaridad más: suelen llegar de forma inesperada. A no ser que seamos bomberos, médicos,

que gestionemos una red eléctrica a gran escala o que nos dediquemos a un trabajo similar, los colapsos no forman parte de nuestra planificación diaria. No hay una "ciencia del colapso" que se enseñe en las universidades o en las escuelas de negocios, y la mayor parte de lo que hacemos se basa en la idea de que las cosas seguirán más o menos como hasta ahora. Se supone que la economía va a crecer siempre, simplemente, porque ha estado creciendo hasta ahora. Lo mismo ocurre con la población humana, la producción de petróleo o la esperanza de vida al nacer: han venido creciendo en el pasado y se espera que sigan creciendo en el futuro. Los organismos e instituciones que elaboran previsiones en estos ámbitos trabajan principalmente sobre la base de extrapolaciones de los datos históricos de las últimas décadas y tienden a presentar un panorama halagüeño del futuro. Se trata de un problema general que tenemos con la gestión del futuro: ¡nadie quiere profecías catastrofistas! Sin embargo, como todos sabemos, el crecimiento no puede continuar para siempre en un mundo finito (como deberíamos saber a menos que estemos locos o seamos economistas, una cita atribuida a Kenneth Boulding). Por lo tanto, deberíamos estar preparados para la otra cara del crecimiento mucho antes del colapso.

Pero ¿qué causa los colapsos? En la Antigüedad, parece que la gente tendía a culpar a entidades sobrenaturales, a los dioses o a la magia maligna de los desastres que les ocurrían. El primero en señalar que los colapsos son un fenómeno natural, un hecho de la vida, fue quizás el filósofo romano Lucio Anneo Séneca en una nota de una de sus cartas a su amigo Lucilio, escrita durante el siglo I d. C. Mucho más tarde, en el siglo XVII, Galileo Galilei fue el primer científico que intentó dar una explicación matemática a los colapsos en el estudio de la rotura de objetos sólidos.

La observación de Séneca siguió siendo cualitativa, mientras que Galileo carecía de las herramientas matemáticas que habría necesitado para construir una teoría completa de la rotura. Así pues, la verdadera comprensión de la física del colapso justamente ha llegado en tiempos recientes con el desarrollo de la ciencia de los sistemas complejos. Los resultados de décadas de trabajo nos dicen que los cambios rápidos forman parte del funcionamiento del universo, una manifestación del principio que lo rige todo, desde las células vivas hasta las galaxias: la entropía, base del segundo principio de la termodinámica. La ciencia de la complejidad es, posiblemente, el campo más fascinante de la ciencia moderna y, sin duda, uno de los que tiene mayores

consecuencias para nuestra vida cotidiana.

De este campo de la ciencia en rápida evolución surgió el concepto del "efecto Séneca". Vio la luz por primera vez en 2011 en forma de un pos*t en* mi blog El *legado de Casandra (B*ardi, 2011). Más tarde, publiqué un modelo matemático más detallado en la revista científica Sus*tainability (B*ardi, 2013) Posteriormente, en 2017, publiqué un libro que titulé El *efecto Séneca (B*ardi, 2017). No creo que sea un libro difícil de leer, pero también es cierto que fue concebido como un libro académico, con todas las fórmulas y modelos matemáticos adecuados. Pero la ciencia del colapso no es solo para los académicos: es una ciencia que todo el mundo debería conocer y utilizar, al menos sus aspectos principales. Ese es el origen de este libro, que no constituye una versión simplificada del primer libro de Séneca, sino uno completamente nuevo, con nuevos ejemplos, nuevas discusiones y nuevos campos de aplicación, también basados en gran medida en mi experiencia personal.

Por ello, este libro se dedica al modo de afrontar los colapsos preparándonos antes de que lleguen. Esto no significa resistirse al colapso a toda costa, intentando mantener las cosas tal como están; hacer eso significa, normalmente, ganar algo de tiempo a cambio de un colapso mucho más rápido y abrupto: a todas luces un mal negocio. Hay muchos ejemplos de este concepto y seguro que se te ocurren algunos de tu experiencia personal; tal vez, el más evidente sea el de los debates en las redes sociales. Cuanto más intentes rebatir a tu oponente, más verás que se resiste y responde a tus argumentos. Esto suele provocar el fenómeno llamado flam*ing, q*ue hace que la discusión degenere en un intercambio de insultos y ataques personales: ¡un colapso del debate!

En cambio, la forma de afrontar los colapsos es utilizar lo que aquí llamo la "estrategia Séneca". Se trata de un punto de vista que se deriva de una interpretación de la obra de Séneca como filósofo estoico, pero que también es perfectamente compatible con el campo moderno llamado "dinámica de sistemas" que Jay Forrester desarrolló en la década de 1960. La idea básica de la estrategia Séneca es que los intentos de evitar el colapso tienden a empeorarlo (Meadows, 1999). También es una idea que cuenta con elementos en común con algunas artes marciales, como el jiu-*jitsu o s*u encarnación moderna, el judo, en las que quienes las practican tienen como objetivo

manipular la fuerza del adversario contra ellos mismos en lugar de enfrentarse a él con la propia fuerza. Así pues, la estrategia Séneca consiste en no oponerse a la tendencia del sistema a ir en una determinada dirección, sino en dirigirlo de tal manera que el colapso no tenga que producirse. La clave de la estrategia es evitar que el sistema acumule tanta tensión que luego se vea obligado a descargarla de forma brusca. Piensa en la historia de la paja que rompió la espalda del camello: el colapso no se habría producido si el dueño del camello hubiera evitado sobrecargar a la pobre bestia con cosas pesadas.

Pero no siempre es posible evitar el colapso, aunque se pueda detectar antes de que llegue. A veces, es demasiado tarde: el sistema ha crecido más allá de sus límites y ahora se encuentra en una condición inestable que llamamos "sobregiro". En este caso, el sistema tiene que volver a sus límites aceptables, una condición que a veces se llama "capacidad de carga". Lo mejor que se puede hacer es suavizar el impacto y prepararse para el aterrizaje. Pasará por lo que yo llamo el "cuello de botella Séneca" con vistas a reiniciar posteriormente y actuar de una mejor y más sabia manera. Eso puede llamarse el "rebote Séneca". Un buen ejemplo es la industria de los combustibles fósiles: podemos ver su inminente colapso y que*remos que* se derrumbe para evitar una catástrofe climática, pero no tan rápido que su caída mate a miles de millones de personas al privarlas de la energía que necesitan para sobrevivir. La industria petrolera debe seguir extrayendo únicamente el mínimo necesario para crear la infraestructura de energía renovable que sustituirá a la fósil después del colapso inevitable. Esto es lo que he llamado la "vía del sembrador" (Sgouridis, Bardi y Csala, 2016) y es una variante de la estrategia Séneca.

Otra habilidad útil derivada de la estrategia Séneca es cómo se puede aprovechar el colapso para deshacerse de estructuras y organizaciones anticuadas e inútiles. Estoy seguro de que conoces muchos ejemplos de organizaciones irremediablemente retorcidas y corruptas de las que has pensado que deberían ser borradas y reconstruidas desde cero. Probablemente, tienes en mente su gobierno, pero también es posible pensar en sistemas mucho más pequeños: muchas personas intentan mantener su matrimonio unido más allá de lo razonable y en muchos casos el divorcio, el colapso de un matrimonio, es la mejor opción. Pero una empresa también puede ser incapaz de sobrevivir en el mercado, agobiada por productos

obsoletos, por una estrategia anticuada, por una organización ingobernable. En este caso, la quiebra es la manera de llamar al colapso y, de nuevo, es una forma de empezar desde cero. Hay muchos otros casos de colapsos que dan lugar a que algo nuevo y mejor surja de las cenizas de lo antiguo.

Por último, hay otra aplicación de la ciencia del colapso que Séneca seguramente habría desaprobado, pero que no puedo dejar de mencionar: destruir al propio enemigo o competidor. Puede ser una estrategia militar: normalmente, un conflicto termina cuando uno de los dos bandos se derrumba y no es capaz de seguir luchando. Esto puede ocurrir porque su aparato militar haya sido dañado más allá de sus límites de resistencia durante la contienda, pero también que se produzca como resultado de cosas oscuras y terribles que, hoy en día, reciben el nombre de psy*ops (o*peraciones psicológicas). Entonces, por supuesto, nada impide que se utilicen métodos similares en los negocios para provocar el colapso de un competidor: pensemos en el dum*ping, t*ambién definido como "precios predatorios". E incluso en el amor, quizá la empresa humana más competitiva, existen formas objetables pero eficaces de deshacerse de los competidores. ¿Recuerdas que Hamlet dijo "aunque seas tan casto como el hielo y tan puro como la nieve no escaparás de la calumnia"?

En resumen, las bases de la estrategia Séneca pueden describirse en cuatro puntos principales:

1. Ate*nción. R*ecuerda que los colapsos ocurren y no solo afectan a otras personas: pueden afectarte a ti. ¡Prepárate de antemano para un posible colapso!
2. Elu*sión. P*uedes evitar el colapso si empiezas con suficiente antelación a actuar sobre los elementos que ponen en tensión el sistema. Detecta los colapsos antes de que se produzcan.
3. Mit*igación. S*i es demasiado tarde para evitar el colapso, aún puedes reducir sus efectos dañinos tomando las precauciones adecuadas. No intentes evitar el colapso a toda costa, ¡aunque siempre puedes suavizarlo!
4. Exp*lotación. E*n algunos casos, puedes utilizar el colapso para deshacerte de estructuras obsoletas o para perjudicar a tus competidores. Y, por tanto, ¡bienvenido sea el colapso!

Espero que este libro te resulte útil tanto para tu vida como para tu carrera, pero ten en cuenta que es algo más que un manual para gestionar colapsos. Dado que parte de una frase de un filósofo estoico, tiene un cierto enfoque basado en la filosofía estoica. Los estoicos ya habían comprendido muchas cosas hace dos mil años, la principal de las cuales es, quizás, que no se puede predecir el futuro, pero se puede estar preparado para él.

Ugo Bardi
Florencia, *Italia*

BIBLIOGRAFÍA

Bardi, U. (2011): "Modelos de mundo del tamaño de la mente", Sus*tain, v*ol. 5, pp. 896-911.

— (2017): El *efecto Séneca. Por qué el crecimiento es lento pero el colapso es rápido, N*ueva York, Springer.

Griffith, E. (2019): "Un unicornio perdido en el Valle. Evernote hace estallar el evangelio del 'Fail Fast'", The *New York Times.*

*M*eadows, D. H. (1999): "Leverage Points: Places to Intervene in a System", https://donellameadows.org/.

Sgouridis, S.; Bardi, U. y Csala, D. (2016): "The sower's way. Quantifying the narrowing net-energy pathways to a global energy transition", https://bit.ly/3zCIA4S.

NOTAS

1. Puede consultarse la noticia en https://bit.ly/3aCHpYW [N. del T.].

AGRADECIMIENTOS

La primera persona a la que hay que dar las gracias por este libro es a Charles Hall, pionero de la economía biofísica, que puso en marcha muchas cosas en un campo que no habría sido el mismo sin él. Dennis Meadows y Jorgen Randers son algunos de los que me pusieron en el camino del estudio de la dinámica mundial, al igual que Colin Campbell me enseñó sobre el agotamiento del petróleo. También, a Dave Packer, que hizo posible este libro, a Dmitry Orlov, por haberme empujado a desarrollar un modelo para sistemas de colapso rápido, a Luca Mercalli, por recordarme cómo Séneca había descrito la ruina en sus cartas. A Thomas Gaudaire-Thor por hablarme del fascinante concepto de "egregor". A mis colegas Francesca di Patti, Sara Falsini, Gianluca Martelloni e Ilaria Perissi que han trabajado conmigo en el difícil campo de la modelización de la economía mundial. A mis compañeros y amigos rusos, Konstantin Eltsov, Andrey Klimov, Irina Kurzina y Tatiana Yugay que, entre muchos otros, me enseñaron a sobrevivir a un mal colapso social. A mis alumnos Beatrice Barletti, Ilaria Garbari, Federico Licciardi y Koi Leo Ian Ioshi Merc que aguantaron mis farragosas conferencias y aceptaron amablemente posar para una de las ilustraciones del presente libro. También me gustaría agradecer a Susan Kucera su interés por estas cuestiones que transmite en sus películas. A Alessia Roberta Scopece, clasicista y medievalista, que ha sido una notable fuente de inspiración, así como a Valeria Fenudi que proporcionó algunas de las figuras del libro, a Miguel Martínez que editó y revisó el texto. Además, a mi esposa Grazia, que tuvo la amabilidad de tener paciencia conmigo durante mis días de inmersión total en la escritura de este libro. Y a todos los lectores del blog El *legado de Casandra qu*e amablemente me sugirieron una lista de títulos que me sirvió para seleccionar el que creo que es el adecuado. Por último, una nota de elogio para mi ayudante unicelular ficticia, Amelia la ameba, que resultó ser bastante popular entre mis alumnos.

1. LA CIENCIA DE LA PERDICIÓN: MODELAR EL FUTURO

> Las previsiones no siempre son erróneas; la mayoría de las veces pueden ser razonablemente precisas. Y eso es lo que las hace tan peligrosas. Suelen construirse partiendo del supuesto de que el mundo de mañana será muy parecido al de hoy. A menudo funcionan porque el mundo no siempre cambia. Pero, tarde o temprano, las previsiones fracasarán cuando más se necesitan: al anticiparse a cambios importantes en el entorno empresarial que hacen que estrategias enteras queden obsoletas.
>
> Pierre Wack (1985)

> No moriré ni un minuto antes de que Dios lo haya decidido.
>
> Mike Ruppert, *Cruzando el Rubicón* (2004)

PREDECIR EL FUTURO: LA RULETA RUSA

Cuando doy charlas públicas, a veces me llevo una pistola de juguete y se la enseño al público. Les hago esta pregunta: imagina que nunca has visto una pistola, ¿cómo sabrías qué es y para qué sirve? Por lo general, la gente del público entiende inmediatamente el mensaje: la pistola es una metáfora del cambio climático. ¿Cómo sabemos de qué manera funciona el clima de la Tierra? ¿Y cómo podemos saber el tipo de daño que puede causarnos? Se trata del campo que llamamos "epistemología", ¿cómo sabemos las cosas que sabemos? Tanto si se trata de armas como de cambio climático, la ignorancia puede matar y la epistemología puede ser una herramienta de supervivencia.

La idea de un artefacto desconocido que resulta ser un arma es un tropo típico de la ciencia ficción. Cuando el héroe de la historia encuentra por casualidad una pistola de rayos o un fáser abandonado por los extraterrestres, normalmente consigue entender inmediatamente para qué sirve y utilizarlo contra sus enemigos extraterrestres; es un tema que se ha visto recientemente en la película *Cowboys & Aliens* (2011). Más raro es el caso de extraterrestres que tropiezan con un arma fabricada por el ser humano, aunque el tema fue explorado por Gilda Musa (1964) en una delicada e inteligente historia escrita en los años sesenta en la que unos exploradores humanos introducen una

pistola en una civilización de pacíficos alienígenas. Como te puedes imaginar, se produce una tragedia.

Entonces, sigamos esta idea. Supongamos que eres un extraterrestre y que, de alguna manera, encuentras este extraño objeto. Nunca has visto nada parecido y solo sabes que lo han dejado esos extraños terrícolas. Son una raza difícil, así que puedes sospechar que se trata de un objeto peligroso, tal vez un arma. Pero ¿cómo saberlo? Enmarcada en estos términos, tenemos una pregunta muy pragmática que no nos lleva a etéreos razonamientos filosóficos. Lo que tenemos que hacer es construir un mod*elo de* la entidad desconocida que nos diga cómo tratarla y —en particular— si esta es peligrosa o no.

Algunas personas tienden a menospreciar los modelos como algo puramente teórico, en contraposición al mundo real. Pero esa es una visión completamente equivocada: los modelos son necesarios y los construimos todo el tiempo en nuestra vida cotidiana. A este respecto, conviene citar a Jay Forrester, uno de los mayores constructores de modelos del siglo XX, la persona que desarrolló el método de cálculo utilizado para el artículo "Los límites del crecimiento":

> Cada uno de nosotros utiliza modelos constantemente. Todas las personas, tanto en su vida privada como en los negocios, utilizan instintivamente modelos para tomar decisiones. Las imágenes mentales que tenemos en la cabeza sobre nuestro entorno son modelos. La cabeza de cada uno no contiene familias, empresas, ciudades, Gobiernos o países reales. Uno utiliza conceptos seleccionados y relaciones para representar sistemas reales. Una imagen mental es un modelo. Todas las decisiones se toman sobre la base de modelos. Todas las leyes se aprueban sobre la base de modelos. Todas las acciones ejecutivas se toman sobre la base de modelos. La cuestión no es utilizar o ignorar los modelos; la cuestión es solo una elección entre modelos alternativos (Forrester, 1971).

Los modelos pueden ser complicados o simples, pueden basarse en ecuaciones, analogías o simplemente en la intuición, pero siempre son la misma cosa: entidades que existen en nuestra mente y que nos ayudan a planificar y evitar los muchos desastres que podrían esperarnos. Los modelos suelen ser útiles, sobre todo si se ponen a prueba con la experiencia, pero también pueden ser desastrosamente erróneos. Volviendo al ejemplo de la pistola como objeto desconocido, hay varias formas de llevar a cabo modelos malos (en realidad, mortales) sobre ella. Por ejemplo, existe el juego de la ruleta rusa. Consiste en cargar el cilindro de un revólver con una sola bala, hacerla girar al azar y luego apretar el gatillo mientras el cañón apunta a la

propia cabeza. Los orígenes de este juego (si queremos definirlo así) son ficticios: su primera mención se remonta a una novela del escritor ruso Lermontov, El *héroe de nuestro tiempo (1840)*. Pero algunas personas juegan de verdad. No disponemos de buenos datos estadísticos, pero un artículo de Shields, Hunsaker y Stewart (2008) informa de 24 casos de muertes por la ruleta rusa en Kentucky entre 1993 y 2002. Extrapolando estos datos a todo Estados Unidos, podríamos estimar aproximadamente que cada año mueren unas 10-20 personas a causa de la ruleta rusa y, posiblemente, un centenar juegan y sobreviven.

Para la mayoría de nosotros, es evidente que la única manera de ganar a la ruleta rusa es no jugar, pero, evidentemente, algunas personas tienen una comprensión errónea de la estadística y la utilizan para hacer modelos muy malos. Esto no debe ser tan infrecuente, pues de lo contrario nadie jugaría a ningún juego de ruleta, no solo a la versión rusa con pistola. Pero la gente se dedica a jugar, a veces utilizando estrategias peligrosas como la "martingala" que casi garantiza pérdidas desastrosas (Ellemberg, 2008). Los jugadores compulsivos se enfrentan a veces al mismo tipo de ruina de Séneca que puede generar la ruleta rusa pero, en su caso, el precipicio puede estar en una de las ventanas de un piso superior del edificio del casino (Phillips, Welty y Smith, 1997).

Algunas personas, aparentemente, tienden a ver el mundo como dominado por fuerzas que no pueden ser cuantificadas en términos estadísticos. Parecen creer que si su destino está decidido por el plan de Dios, se deduce que la ruleta rusa no puede matarlas: solo morirán si Él decide que lo hagan, de lo contrario, vivirán. Por supuesto, pocas personas confían en Dios hasta tal punto que se arriesguen a dispararse: al fin y al cabo, se supone que Dios es benévolo y misericordioso, pero también se sabe que su paciencia no es infinita. Sin embargo, no es raro encontrar una actitud similar en los debates sobre el cambio climático. Hay quienes están tan convencidos de que el clima de la Tierra está en manos de Dios que para ellos es evidente que nada de lo que hagan los simples humanos puede alterarlo y mucho menos por aumentar la concentración de un gas de efecto invernadero de unos pocos cientos de partes por millón. Y por esta razón, la humanidad parece estar empeñada en jugar una partida mortal de ruleta rusa en el que el clima de la Tierra es un arma cargada.

¿Podemos construir modelos mejores que estos ejemplos que ponen en riesgo nuestra vida? Por supuesto que sí. En general, hay dos formas de construir modelos: el método top-*down y* el bot*tom-up. E*l primero se basa a veces en datos estadísticos y consiste en tratar el sistema como una "caja negra". Se observa lo que hace el sistema y se construye un modelo a partir de lo que se ve, sin preocuparse demasiado de los mecanismos internos de lo que se examina. Una versión moderna de este enfoque heurístico se llama "método de inferencia bayesiano". La idea es que primero se asigna una determinada probabilidad a la hipótesis (denominada "previa") y luego se actualiza a un nuevo valor (denominado "posterior") a la luz de nuevos datos o pruebas. A continuación, se repite hasta obtener un determinado valor estable o, en todo caso, adaptar las estimaciones a un sistema cambiante. Se trata de una variante del modelo general "heurístico" de utilización de datos estadísticos para predecir el futuro.

El segundo método, el bot*tom up, s*e denomina a veces "enfoque reduccionista" y es la base del método científico. Consiste en separar el sistema en subsistemas y examinar cada uno de ellos por separado para luego construir un modelo del funcionamiento del sistema en su conjunto. Como se sabe, este método es relativamente nuevo en la historia de la humanidad. Se formalizó de la manera que conocemos hace solo unos siglos y todavía se está probando y perfeccionando.

Ambos métodos tienen límites. En particular, requieren especialistas y herramientas adecuadas para la realización de un examen exhaustivo que se espera que proporcione una comprensión completa del sistema que se está estudiando. Y eso también requiere tiempo, mientras que, en el mundo real, a menudo no se tienen ni los recursos ni el tiempo necesarios para aplicar estos métodos en su totalidad; especialmente, cuando se trata de cuestiones que pueden ser peligrosas respecto de la cuales no se puede esperar tener certeza científica, suponiendo que esta se pueda tener alguna vez.

En particular, el método de inferencia estadística, también en su versión bayesiana, puede llevarnos a modelos peligrosamente erróneos. Un error clásico es el de la "ley de los números pequeños", identificada por primera vez en 1971 por Tversky y Kahneman (1971). Esta ley establece que la mayoría de las personas tiende a construir modelos sobre la base de muy pocos datos. En particular, pueden dedicarse a 1) hacer apuestas con base en muestras

pequeñas sin darse cuenta de las probabilidades, 2) tener una indebida confianza en las primeras tendencias y en la estabilidad de los patrones observados, 3) tener expectativas excesivamente altas en relación con la replicabilidad de resultados significativos y 4) encontrar siempre una "explicación" causal para cualquier discrepancia.

Apliquemos la ley de los números pequeños al ejemplo de la pistola. Supongamos que eres uno de los extraterrestres de la historia de Gilda Musa y que estás trasteando con el extraño objeto dejado por los terrícolas, tratando de entender cómo funciona. Te das cuenta de la presencia de una cosa metálica que parece una palanca. La pruebas tirando de ella con tu dedo y, sí, es una palanca: actúa sobre el cilindro haciéndolo girar. Parece ser un gatillo que actúa sobre otro pequeño objeto en el lado opuesto del cilindro: sube y baja haciendo un clic. Aprietas el gatillo varias veces y el resultado es siempre el mismo: nada más que ese chasquido. ¿Quizá sea un instrumento musical? El método de inferencia bayesiana te dice que la probabilidad de que el objeto sea un arma disminuye cada vez que aprietas el gatillo y no pasa nada. Al mismo tiempo, la hipótesis de que el objeto sea un instrumento musical es cada vez más probable. A continuación, para escuchar mejor el chasquido, colocas el objeto cerca de tu cabeza (el saliente en forma de cañón de un lado toca directamente tu oreja). Vuelves a tirar de la palanquita y…

Aquí podemos ver claramente el problema de los números pequeños. Probar un revólver unas pocas veces no puede decirte si hay un cartucho vivo en una de las cámaras del cilindro. Y un resultado diabólico del proceso de inferencia bayesiana es que cuantas más veces lo intentas y no pasa nada, más probable es que te parezca que el objeto sea inofensivo. Este problema se da también con asuntos como el cambio climático, el agotamiento del petróleo, el agotamiento de los recursos, el envenenamiento de la biosfera, etc. Disponemos de datos sobre estos sistemas, pero a menudo no para periodos de tiempo suficientemente largos: por ejemplo, el cambio climático es un proceso muy lento que puede resultar desastroso, pero solo en un futuro relativamente remoto. Así, surge la idea de que, como hasta ahora no nos ha ocurrido nada horrible, nunca nos ocurrirá (es una aplicación equivocada del método bayesiano). Una de sus formas es que "la gente ha estado diciendo que el petróleo se agotaría en una fecha ya pasada, eso no ha ocurrido y de ahí se deduce que el petróleo no se va a agotar en el futuro". Y como se sabe, las palabras "hasta ahora, todo bien" fueron las últimas que pronunció el tipo que

caía desde el piso 20 de un edificio.

Un buen ejemplo de las limitaciones de los métodos heurísticos cuando se utilizan solos puede encontrarse en el debate sobre Los *límites del crecimiento* (Meadows et *al.*, 1972), un estudio que intentaba describir la evolución de la economía mundial. No era un modelo heurístico: no trataba la economía mundial como una caja negra. Los autores desmontaron la máquina económica teniendo en cuenta los recursos naturales disponibles, el efecto de la contaminación, el crecimiento de la población humana, etc. Este enfoque resultó incomprensible para muchos economistas formados en el enfoque estadístico llamado "econometría", consistente en un conjunto de técnicas utilizadas para derivar un modelo directamente de los datos históricos. En el conocido libro de texto de Samuelson y Nordhaus, Eco*nomics* (publicado por primera vez en 1948 solo por Samuelson) la econometría se describe como una herramienta "para cribar montañas de datos y extraer relaciones sencillas.

Basándose en este planteamiento, en 1973, William Nordhaus, que más tarde obtendría el Premio Nobel de Economía, publicó un artículo titulado "Measurements without data", en el que criticaba duramente el planteamiento del estudio Los *límites del crecimiento* (aunque en realidad apuntaba a un estudio anterior y similar de Forrester [1971]). Nordhaus afirmaba que el modelo:

> [...] contiene 43 variables conectadas a 22 relaciones no lineales (y varias lineales). Ni *una sola relación o variable se ha extraído de datos reales o estudios empíricos* (cursiva en el original).

Obsérvese cómo Nordhaus piensa en términos de econometría, es decir, que hay que extraer relaciones de los datos en lugar de utilizar consideraciones físicas. Fue el comienzo de una degeneración del debate que viró hacia un choque de absolutos y acabó por relegar el informe Los *límites del crecimiento al* basurero de las teorías científicas erróneas, del que solo ahora está resurgiendo lentamente. Es una historia que conté en detalle en mi libro Los *límites del crecimiento retomados* (Bardi, 2011).

El choque se produjo por una profunda división epistemológica entre dos enfoques diferentes. En sus artículos, Nordhaus contrapuso el modelo de Los *límites del crecimiento a* un modelo propio (Nordhaus, 1992), que había desarrollado a partir de uno anterior de Solow (1956), basado en el ajuste de

las tendencias anteriores de la economía. Se trataba de un modelo casi completamente heurístico: se basaba principalmente en datos pasados y, dado que no se había producido ningún colapso durante el periodo considerado, el modelo no preveía, ni podía prever, un colapso. Casi cincuenta años después del debate, podemos decir que tanto el modelo de Nordhaus como el escenario de "caso base" de Los *límites del crecimiento fu*eron capaces de describir la trayectoria de la economía mundial con una aproximación razonable (Turner, 2008). Los dos modelos divergen en la tercera década del siglo XX y el optimismo de Nordhaus y otros economistas podría resultar ser otro caso del error que se deriva de la ley de los números pequeños descrita por Twersky y Kahneman.

En general, el énfasis puesto en solo mirar los datos sin ni siquiera tratar de construir modelos físicos puede verse como algo relacionado con el enfoque llamado "cetética", palabra de origen griego que significa 'buscar'. La cetética es una forma extrema del método experimental: los cetéticos asumen que los datos son todo lo que se necesita para entender el mundo. El término "cetético" se aplica a menudo al movimiento moderno de la "Tierra plana", cuyos adeptos parecen pensar que, como la Tierra parece plana, debe de serlo. Se niegan a ver nuestro planeta como una esfera, porque la evidencia de una forma esférica es una teoría, no una observación experimental directa. Como método de investigación, la cetética puede tener algunos puntos buenos, pero si se aplica de forma literal, puede resultar suicida. En el ejemplo de la pistola, los cetéticos se negarían a creer que una pistola puede matar a alguien hasta que la vieran matar realmente a alguien y, posiblemente, mantendrían que esto solo demuestra que la pistola que se ha probado en concreto es peligrosa. A una escala mucho mayor, la posición del cetético de "tráeme una prueba experimental" podría llevar a toda la humanidad a un desastre apocalíptico causado por las consecuencias del cambio climático (pero hay que decir que los terraplanistas, en honor a la verdad, sí creen que el cambio climático causado por el hombre es real [Letzer, 2018]).

Así pues, limitarse a mirar los datos estadísticos puede llevarnos fácilmente por el mal camino con modelos de sistemas complejos y potencialmente peligrosos como el del clima de la Tierra. ¿Qué hay del otro método posible, el enfoque reduccionista "ascendente"? ¿Es mejor para generar buenos modelos que el enfoque estadístico? En algunos casos sí y, de hecho, es la herramienta

básica del método científico "duro". En campos como la física y la química, los científicos están acostumbrados a realizar experimentos de laboratorio cuidadosamente elaborados en los que separan y cuantifican los distintos elementos de sistemas que pueden ser muy complejos. En ingeniería, por ejemplo, se estudia la capacidad de un determinado elemento de una estructura, por ejemplo, un avión o un puente, realizando pruebas separadas de los materiales que lo componen. Se supone que el comportamiento de una aleación metálica en forma de probeta de reloj de arena en una máquina de ensayos será el mismo que en una estructura real. Normalmente, esto resulta ser correcto, aunque se trata de una conclusión que debe tomarse con mucha precaución.

Aplicar el modelo reduccionista al ejemplo de la pistola como objeto desconocido implica desmontarla. El experimentador debería ser capaz de determinar que el objeto que sube y baja, empujado por la palanca de la parte inferior, puede golpear e inflamar los productos químicos contenidos en el interior de un pequeño cilindro de latón que, a su vez, impulsaría fuera del objeto un trozo de unos pocos gramos de plomo a una velocidad de unos cientos de metros por segundo. Por supuesto, el método reduccionista puede decirnos que "esta cosa" es muy *pel*igrosa.

Dentro de ciertos límites, el enfoque reduccionista es aplicable también a sistemas más complejos, por ejemplo el clima de la Tierra. Podemos identificar varios subsistemas de la atmósfera terrestre y estudiar cada uno de ellos por separado. El hecho de que el dióxido de carbono (CO_2) absorba la radiación infrarroja es conocido desde los primeros experimentos de John Tyndall en 1859. Posteriormente, en 1896, Svante Arrhenius fue el primero en proponer que el CO_2 tenía un efecto de calentamiento en la atmósfera terrestre y que la quema de combustibles fósiles provocaría un aumento de las temperaturas atmosféricas (Arrhenius, 1896). Este fue el origen de la idea del calentamiento global provocado por los "gases de efecto invernadero" y el "efecto invernadero", aunque Arrhenius no utilizara estos términos. A lo largo de los años, se desarrollaron modelos cada vez más sofisticados para decirnos qué tipo de aumento de temperatura podemos esperar si seguimos vertiendo este tipo de gases en la atmósfera.

Pero, por supuesto, ni Arrhenius ni nadie pudo hacer un experimento de laboratorio que demostrara el concepto de calentamiento de la atmósfera

terrestre por el efecto invernadero. Algunos aficionados entusiastas intentan hacerlo en casa utilizando tarros de cristal o botellas de Coca-Cola. La mayoría de estos experimentos resultan estar mal hechos o simplemente son erróneos (Bardi, 2018). Incluso cuando se hacen correctamente, todo lo que pueden mostrar es que un recipiente de vidrio irradiado se calienta un poco cuando contiene más CO_2 en su interior. Pero eso no demuestra nada más que lo que Tyndall ya había demostrado hace un siglo y medio. El problema es que las propiedades de la atmósfera no pueden reproducirse exactamente en un laboratorio: basta pensar en la densidad variable de la atmósfera en función de la altura, ¡eso no se puede reproducir en una botella de Coca-Cola!

Se trata de un problema especialmente grave en el caso de algunos modelos de la atmósfera. Quizá hayas oído hablar de la teoría de la "bomba biótica" desarrollada por dos investigadores rusos, Anastassia Makarieva y Victor Gorshkov (2009). La teoría pretende explicar el hecho de que las selvas tropicales consiguen atraer una gran cantidad de precipitaciones y se basa en un fenómeno físico, cuando el vapor de agua se condensa crea una presión negativa. La idea es que la bomba biótica mantiene el bosque húmedo mediante el bombeo continuo de la humedad de los océanos. Es una teoría fascinante, pero ¿cómo podemos demostrar que es correcta? No se puede crear una selva tropical en un laboratorio y la única manera de probar la teoría es mediante la construcción de modelos y la comparación con datos del mundo real. Pasará tiempo antes de que la comunidad científica llegue a un acuerdo sobre la validez de esta teoría.

¿Significa eso que la idea del calentamiento global provocado por el hombre no está respaldada por datos experimentales? En absoluto, pero hay que entender cómo el método científico se ocupa de este tipo de sistemas. La física básica se conoce, los parámetros del sistema pueden medirse, la interacción entre los parámetros puede simularse en modelos informáticos y eso es suficiente para llegar a una serie de conclusiones bien conocidas, como que, en la actualidad, el CO_2 es el principal impulsor del calentamiento observado en la atmósfera terrestre.

Como todos sabemos, no todo el mundo acepta esta conclusión. En la mayoría de los casos, la negación de las características básicas del fenómeno del calentamiento global se basa en consideraciones puramente políticas. Algunos afirman que toda esta historia es un engaño urdido por una cábala de científicos malvados que lo único que quieren es más dinero para ellos en

forma de becas de investigación. Por supuesto, no es posible demostrar rigurosamente que no sea así, aunque se puede argumentar razonablemente que la existencia de tal cábala es, en el mejor de los casos, una suposición muy improbable. Pero, a veces, la negación se basa en un enfoque cetético: a menudo se afirma, por ejemplo, que "no hay pruebas" de que el CO_2 caliente la Tierra. En este tipo de enfoque epistemológico, para "probar" que el CO_2 calienta la Tierra, se necesitaría una serie controlada de experimentos en los que se examine la concentración de CO_2 en la atmósfera mientras se miden los efectos en las temperaturas y al mismo tiempo se comprueben los efectos en el ecosistema planetario. Un experimento que habría que llevar a cabo a escala planetaria y, obviamente, un tanto difícil de ejecutar, sobre todo debido a la parte que implica el colapso del ecosistema.

En general, podemos decir que hay muchas formas de ver el mundo, pero que ninguna nos da una certeza absoluta de lo que podría ser el futuro. Siempre intentamos hacerlo lo mejor posible, pero no siempre con éxito. Algunas veces nos equivocamos por un exceso de precaución, otras, por descuido o por exceso de optimismo; no obstante, es una buena idea utilizar modelos para entender el mundo que nos rodea y construir modelos de lo que esperamos de él. El método científico, aunque no es una panacea, puede ayudarnos mucho en esta tarea. Confiar en Dios también puede ayudar, pero, como dice el viejo refrán, hay que intentar mantener la pólvora seca.

¿CUÁN BUENO PUEDE SER UN MODELO?: ANOCHECER EN LAGASH

En 1941, Isaac Asimov publicó una de las historias de ciencia ficción más conocidas de todos los tiempos, *Anochecer*. En él hablaba de un remoto planeta llamado Lagash, habitado por una especie de alienígenas inteligentes. En la historia, Lagash está constantemente iluminado por al menos uno de los seis soles de su sistema estelar múltiple, pero, cada mil años aproximadamente, un eclipse del sol principal hace que el lado del planeta donde viven los lagashianos quede en completa oscuridad. No están preparados para la oscuridad repentina, el *shock* les hace enloquecer y empiezan a quemar todo lo que tienen a mano, solo para tener algo de luz. Esa es la causa de los colapsos cíclicos de su civilización que los arqueólogos lagashianos habían observado pero no habían podido explicar.

El drama de la historia de Asimov está relacionado con la forma en que un grupo de científicos lagashianos fue capaz de predecir el siguiente anochecer estudiando los movimientos de los soles del sistema y extrapolando luego sus trayectorias. Así es como la predicción es contada por uno de los científicos en la novela:

Los complejos movimientos de los seis soles fueron registrados y analizados y descifrados. Teoría tras teoría se avanzó y se verificó y se contraverificó y se modificó y se abandonó y se revivió y se convirtió en otra cosa. Fue un trabajo endiablado. [...] Hace veinte años se demostró finalmente que la ley de gravitación universal explicaba exactamente los movimientos orbitales de los seis soles. Fue un gran triunfo.

Aquí, Asimov nos cuenta cómo las llamadas ciencias "duras", la física en particular, pueden proporcionar modelos cuyas predicciones son exa*ctas. L*os lagashianos tuvieron dificultades para encontrar la ley de la gravitación universal porque su sistema estelar era mucho más complejo que el sistema solar, donde los planetas describen órbitas casi circulares alrededor de un solo sol. Pero finalmente llegaron al mismo resultado que sus colegas terrestres y pudieron utilizar la ley para hacer predicciones. El propio Asimov era un científico y sus historias se basaban en una física sólida. En 2014, Deshmuk y Murty (2014) realizaron cálculos para demostrar que un sistema estelar similar al descrito por Asimov podría existir realmente.

Dejando de lado el complicado sistema estelar de Lagash, aquí en la Tierra sabemos muy bien que la ley de gravitación de Newton es uno de los puntos fuertes de la física clásica, hasta el punto de que la predicción de eclipses es uno de los éxitos más impresionantes de la astronomía. Tanto es así, que un tema recurrente en novelas y películas es cómo un explorador abandonado impresiona a los ignorantes de alguna tribu remota prediciendo un eclipse solar que, más tarde, se produce puntualmente. A raíz de esto, los miembros de la tribu lo convierten en su rey-dios o algo así. El sistema solar es realmente un mecanismo de relojería y los movimientos de los principales cuerpos que forman parte de él son regulares y predecibles. De hecho, durante el siglo XVIII, los modelos mecánicos del sistema solar basados en la tecnología de los relojes se pusieron de moda. Estos modelos se llamaron "orrerías" por Charles Boyle, cuarto conde de Orrery.

Pero ¿hasta qué punto puede ser preciso un modelo? En algunos casos, puede serlo mucho. Se puede utilizar la ley de Newton para calcular el

movimiento de una sonda espacial y dirigirla hacia un destino a cientos de millones de kilómetros de la Tierra. En principio, se puede utilizar la ley para calcular la trayectoria de cualquier fracción de masa en movimiento en un campo gravitatorio. Tal vez se podría aplicar a cada átomo que se mueva en el universo: solo sería cuestión de saber qué fuerzas actúan sobre él y cuál es la velocidad y posición actuales de cada partícula. De este modo se aplicaría la ecuación de la gravedad de Newton, teniendo en cuenta también los campos eléctricos y magnéticos, y se podría predecir exactamente la trayectoria de todas las partículas del universo. Tendríamos un modelo todopoderoso que nos diría exactamente cuál será el futuro.

Este punto de vista se denomina "determinismo científico" y suele atribuirse a Pierre-Simon de Laplace (1749-1827). En su *Ensayo filosófico sobre las probabilidades* (1814), habló de una "inteligencia" capaz de tener este tipo de conocimiento que la haría todopoderosa. Más tarde, se acuñó el término "demonio de Laplace" para esta hipotética criatura (pero ¿por qué no una "demonia"? La corrección de género debería imponerlo). Evidentemente, si se disponía de la potencia de cálculo necesaria para simular a esta demonia, se podía predecir el futuro con gran precisión: ningún colapso escaparía a la detección anticipada. Al igual que los astrónomos ficticios de Lagash fueron capaces de predecir el eclipse solar que sumiría a su mundo en el caos, nosotros seríamos capaces de predecir cosas como terremotos y huracanes. Incluso las crisis financieras se detectarían con mucha antelación: ¡los agentes económicos también están hechos de átomos!

No hace falta que diga que esto no es posible. Existen buenas razones científicas, la mecánica cuántica, la termodinámica, la teoría del caos y otras más, que nos dicen que la demonia de Laplace se confundiría rápidamente y se perdería por las galaxias. Sin entrar en estas cuestiones, hay simples problemas prácticos que hacen imposible las predicciones exactas a largo plazo. Richard Feynman trata este punto en su libro *Lectures in Physics* (1964, III: 2-9):

> Es cierto, clásicamente, que si conociéramos la posición y la velocidad de cada partícula en el mundo, o en una caja de gas, podríamos predecir exactamente lo que ocurriría. Y, por tanto, el mundo clásico es determinista. Supongamos, sin embargo, que contamos con una precisión finita y no sabemos *exactamente dónde* se encuentra un solo átomo, digamos que una parte entre mil millones. Entonces, a medida que avanza, choca con otro átomo, y como no conocíamos una posición mejor que una parte entre mil millones, encontramos un error aún

mayor en la posición después de la colisión. Y eso se amplía, por supuesto, en la siguiente colisión, de modo que si empezamos con un error minúsculo, este se amplía rápidamente hasta una incertidumbre enorme. [...] dada una exactitud arbitraria, por muy precisa que sea, se puede encontrar un tiempo lo suficientemente largo como para que no podamos hacer predicciones válidas para ese tiempo.

Así pues, todas las mediciones adolecen de incertidumbres y estas tienden a acumularse, haciéndose mayores a medida que pasa el tiempo. A la larga, la incertidumbre se vuelve demasiado grande para hacer cualquier predicción. Por ejemplo, un buen cronómetro mecánico puede tener una precisión del orden de 5 segundos por día, por lo que puede seguir dando una hora aproximadamente correcta durante varios días, incluso durante varias semanas si no se es demasiado exigente; pero no durante varios meses, a menos que se sincronice periódicamente con algún otro dispositivo de cronometraje más preciso. Si no puede hacerlo, es como el viejo chiste que dice que el mejor reloj es el reloj que se ha parado porque, al menos, ¡puede dar la hora exacta dos veces al día!

Incluso para el caso del sistema solar, no podemos descartar que, dentro de cientos de millones de años, las interacciones entre los diversos cuerpos del sistema puedan llevar a desestabilizar las órbitas de algunos de los planetas, pudiendo hacer que Mercurio, Marte o Venus colisionen entre sí o con la Tierra. La posibilidad de que el sistema sea caótico en una escala de tiempo larga, es decir, que siga una trayectoria impredecible y siempre diferente, ha sido discutida en varias ocasiones y algunos científicos afirman que es así (Laskar y Gastineau, 2009). Por lo tanto, no es imposible que en el futuro el sistema solar pase por una especie de precipicio de Séneca, con las órbitas planetarias desestabilizadas por oscilaciones internas. O que, alternativamente, otra estrella pueda deslizarse cerca, como ocurre en el cuento de H. G. Wells "La estrella" (1897), una de las primeras obras de ficción que describe una catástrofe cósmica. En el relato, la estrella se aleja después de haber causado todo tipo de desastres a la humanidad, pero sin dejar daños permanentes en nada. Sin embargo, si esto ocurriera de verdad, la gravedad de la estrella podría afectar al sistema con la suficiente fuerza como para que los planetas se desviaran de sus órbitas. Afortunadamente, la densidad de estrellas en nuestra región de la galaxia es lo suficientemente baja como para que la probabilidad de este tipo de colisión sea realmente infinitesimal.

Dejando de lado estos escenarios dramáticos, el límite de todos los modelos

de futuro es la pérdida gradual de información a medida que se avanza en el tiempo. Forma parte de las leyes generales del universo, es la entropía haciendo su trabajo. Un buen ejemplo es el modelo llamado "paseo aleatorio". Imagina que ves a un hombre borracho parado en algún lugar de la acera. Lo ves, así que sabes exactamente dónde está. Ahora, supongamos que te alejas, pensando en volver al cabo de un rato. Mientras tanto, el hombre borracho —al estarlo— caminará al azar en una u otra dirección por la acera. La pregunta es: ¿puedes predecir dónde estará cuando vuelvas?

En este sencillo caso, no se necesitan ecuaciones para entender que si un paso en una dirección es tan probable como un paso en la dirección opuesta, entonces el punto más probable donde encontrar al borracho en la acera será el punto de partida. Sin embargo, hizo falta un tratamiento matemático, desarrollado por primera vez por Gauss, para determinar la probabilidad de encontrar al borracho a cierta distancia del punto de partida en función del número de pasos. Esta distancia aumenta gradualmente: el modelo gaussiano te dice que va con la raíz cuadrada del número de pasos.

No son solo consideraciones destinadas a contentar a los estadísticos. Tienen aplicaciones en el mundo real: por ejemplo, imagina que estás al mando de un buque antisubmarino y estás buscando un submarino enemigo, sabes dónde estaba en un momento determinado pero luego le pierdes la pista. Ahora bien, ¿dónde podría haber ido? Podrías buscar al azar, como hacen los jugadores en el juego de mesa de batalla naval, pero hay formas mejores. Los modelos estadísticos pueden decirte algo sobre dónde podría estar el submarino, suponiendo que el capitán se haya movido al azar para escapar de la detección. Hay modelos más sofisticados, como el de "vuelo de Lévy" (VL), en el que el agente buscador se mueve aleatoriamente pero con una distribución de saltos de la "ley potencial". Esto significa que la probabilidad de un salto de largo alcance es mayor de lo que sería en una búsqueda puramente aleatoria. Este algoritmo hace que la fuerza de búsqueda actúe como un depredador salvaje que salta en busca de la presa, como parecen hacer los depredadores reales cuando no tienen un objetivo dentro de su rango sensorial (Palyulin, Chechkin y Metzler, 2014).

Estas consideraciones nos dicen algo sobre las limitaciones de los modelos: ninguno puede predecir exactamente el futuro. Pero esto no significa que los modelos sean inútiles, solo que hay que utilizar los modelos sabiendo lo que pueden hacer y lo que no. No se puede predecir el futuro, es cierto, pero eso no

significa que no se pueda estar pre*parado par*a él, y eso es lo que realmente se necesita. No se trata de modelos perfectos y exhaustivos, sino de modelos lo suficientemente buenos. Y la mayoría de los modelos pueden serlo si se tiene el cuidado de evitar pedirles que hagan cosas que no pueden hacer.

Así pues, necesitamos modelos, y los modelos pueden ser simples o complicados, pueden estar basados en ecuaciones matemáticas, leyes físicas, inferencia estadística o simplemente en la intuición humana. Se trata siempre del mismo concepto: un modelo es una representación virtual de lo real. Podemos "ejecutarlo" en el espacio virtual de nuestra mente o mediante un ordenador y esperar que el modelo describa lo suficientemente bien el sistema real que se supone que describe y nos diga lo que podemos esperar de él.

Algunos modelos son claramente erróneos, como suponer que todas las rubias son tontas. Jay L. Zagorsky (2016), de la Universidad Estatal de Ohio, utilizó un análisis estadístico de datos reales para comprobar esta idea. El resultado fue que, como cabía esperar, las rubias no son menos inteligentes que las mujeres con otro color de pelo, y no solo eso, también, que pueden ser ligeramente más inteligentes, aunque este resultado no sea estadísticamente significativo. Así, el estudio confirma una afirmación de Dolly Parton, cantante y actriz rubia estadounidense: "No soy tonta… y tampoco soy rubia". Al contrario, algunos modelos son tan buenos que pueden resultar mortales. Si estás en guerra y una lluvia de proyectiles de artillería cae en tu trinchera, deberías concluir que el enemigo está utilizando buenos modelos para guiar su fuego o, del mismo modo, que tu bando está utilizando malos modelos. Como todo soldado sabe, el fuego amigo nunca es tal.

La regla básica en la elección de los modelos es que tienen que tener en cuenta todos los parámetros relevantes. A este respecto, puede valer la pena citar el viejo chiste de la chica que quería un matrimonio perfecto. Organizó cuidadosamente cada detalle de la ceremonia: el vestido, la comida, la tarta, las flores, las damas de honor, los padrinos y todo lo demás. Solo cometió un error: el marido. Pero también existe la posibilidad del error contrario: que el modelo incluya demasiados parámetros. ¿El modelo debe tratar de seguir la realidad en todos sus detalles o puede desatender algunos? No hay reglas rigurosas respecto a este punto, pero muchos modelistas caen en la tentación de incluir tantos parámetros como les sea posible, ya que esto hace que el modelo parezca "mejor" y, para un profano, un modelo complicado suele

contar con un halo de verdad proveniente de su misterioso funcionamiento.

A veces, la gente se acerca a estos modelos enormemente complicados con el mismo asombro que en la Antigüedad debían sentir las personas al acercarse a la pitonisa del oráculo de Delfos. Pero muchos parámetros aumentan la incertidumbre y, con un gran número de grados de libertad en las ecuaciones del modelo, siempre existe el riesgo de poder obtener un excelente ajuste de los datos con un modelo equivocado. En algunos casos, se puede obtener un buen ajuste para algunos conjuntos de datos, pero los modelos no tienen ninguna base física y tienen poca capacidad de predicción. En definitiva, el problema fue bien descrito por John von Neumann cuando dijo: "Con cuatro parámetros puedo encajar un elefante, y con cinco puedo hacer que mueva la trompa".

El problema del exceso de parámetros afecta a muchos modelos y puede mitigarse mediante el procedimiento denominado "análisis de sensibilidad" (Saltelli, 2002), que consiste en estudiar cómo se relaciona el resultado del modelo con los cambios en los parámetros de entrada. Se trata de un concepto importante que permite comprobar, por ejemplo, la solidez del modelo, es decir, si pequeñas variaciones en la entrada provocan grandes cambios en el resultado. También puede determinar si algunos parámetros tienen un efecto insignificante y pueden despreciarse sin perder la capacidad de predicción del modelo.

El problema del exceso de parámetros también puede abordarse siguiendo los conceptos desarrollados por Seymour Papert (1980) en los años sesenta, cuando desarrolló el lenguaje de programación Logo. La idea, en este caso, era utilizar modelos "del tamaño de la mente", es decir, Papert estaba interesado en promover el aprendizaje y su idea consistía en crear modelos lo suficientemente simples como para que pudieran ser captados y entendidos por una mente humana media. Se trata de un buen enfoque, el problema es que para la mayoría de la gente, "simple" significa "inexacto" y es difícil convencer a los políticos y a los responsables de la toma de decisiones de que se puede decir algo acerca de hacia dónde va el mundo por medio de unos pocos parámetros.

Suponiendo que se tenga un modelo, hay que saber utilizarlo. Tener un martillo en la mano lleva, de forma manifiesta, a la gente a creer que todo es un clavo y hay que evitar este error con los modelos. Son herramientas y hay que saber cómo y para qué utilizarlas. ¿Queremos realmente predecir el futuro? Y,

si es así, ¿con qué precisión? Y lo que es más importante, ¿cómo vamos a reaccionar a las predicciones que haga el modelo? La última pregunta es probablemente la más importante sobre los modelos. Los modelos se utilizan a menudo para hacer previsiones, pero estas suelen ser erróneas. Así pues, ¿cómo se debe hacer frente a las incertidumbres inherentes a los modelos?

Esta cuestión fue claramente identificada por Pierre Wack —analista estratégico de Shell Oil— cuando separó dos categorías fundamentalmente diferentes: las previsiones y los escenarios. En 1985 escribió:

> Está de moda minimizar e incluso denigrar la utilidad de las previsiones económicas. La razón es obvia: los pronosticadores parecen equivocarse más a menudo que acertar. Sin embargo, la mayoría de las empresas estadounidenses siguen utilizando diversas técnicas de previsión porque aparentemente nadie ha desarrollado una forma mejor de afrontar la incertidumbre económica del futuro.
>
> [...] Pocas empresas dirían hoy que están satisfechas con la forma en que planifican frente a un entorno empresarial cada vez más fluido y turbulento. La planificación tradicional se basaba en previsiones que funcionaron razonablemente bien en los relativamente estables años cincuenta y sesenta. Sin embargo, desde principios de los años setenta, los errores de previsión se han hecho más frecuentes y, en ocasiones, de una magnitud dramática y sin precedentes.
>
> [...] La mayoría de los directivos saben por experiencia lo inexactas que pueden ser las previsiones. En este punto, probablemente haya un gran consenso.
>
> Mi tesis —sobre la que el acuerdo puede ser menos general— es la siguiente: la forma de resolver este problema no es buscar mejores previsiones perfeccionando las técnicas o contratando más o mejores pronosticadores. Existen demasiadas fuerzas que actúan en contra de la posibilidad de acertar en las previsiones. El futuro ya no es estable; se ha convertido en un objetivo móvil. No se puede deducir ninguna proyección "correcta" del comportamiento pasado.
>
> El mejor enfoque, creo, es aceptar la incertidumbre, tratar de entenderla y hacerla parte de nuestro razonamiento. La incertidumbre hoy en día no es solo una desviación ocasional y temporal de una previsibilidad razonable; es una característica estructural básica del entorno empresarial. El método utilizado para pensar y planificar el futuro debe adecuarse a un entorno empresarial cambiante.

Según Wack (1995), la mejor manera de abordar el futuro no es mediante previsiones, sino mediante "escenarios". Los escenarios son lo que los militares utilizan para planificar la guerra, a veces llamados "juegos de guerra". En la guerra, la incertidumbre es una característica básica de la situación: si fuera posible predecir por adelantado el resultado de una guerra, no habría necesidad de librarla. En los negocios o en otros sectores, los

escenarios son lo mismo: un abanico de posibilidades para las que debemos estar preparados.

> Incluso los buenos escenarios no son suficientes. Para que sean eficaces, deben implicar a los altos y medianos directivos en la comprensión del cambiante entorno empresarial de forma más íntima que en el proceso de planificación tradicional. Los escenarios ayudan a los directivos a estructurar la incertidumbre cuando 1) se basan en un riguroso análisis de la realidad, y 2) cambian las presunciones de los responsables de la toma de decisiones sobre el funcionamiento del mundo y los obligan a reorganizar su modelo mental de la realidad. Este proceso implica mucho más que el simple diseño de buenos escenarios. La voluntad de afrontar la incertidumbre y comprender las fuerzas que la impulsan requiere una transformación casi revolucionaria en una gran organización. Este proceso de transformación es tan importante como el desarrollo de los propios escenarios.

Y vemos cuál es el problema: Wack escribía en 1985 sobre un trabajo que había realizado en los años sesenta. Las cosas no han cambiado mucho desde entonces: las empresas siguen pagando a personas para que elaboren previsiones que regularmente resultan ser erróneas; una historia especialmente triste es la de los intentos de predecir los precios del crudo. Uno puede entretenerse buscando pronósticos antiguos y quedarse perplejo al descubrir lo malos que pueden ser. Por ejemplo, nadie predijo el gran repunte de los precios del petróleo de 2008 que llevó el valor del barril de petróleo al máximo histórico de unos 150 dólares, al igual que tampoco nadie predijo el colapso de los precios que le seguiría. Pero Wack y su equipo habían evidenciado correctamente que "algo" iba a ocurrir en torno a 1970, aunque no pudieran predecir exactamente qué.

Wack operaba de acuerdo con un concepto que más tarde, en 2007, Nassim Taleb definiría como la "falacia del pavo" en su libro de 2007 El *cisne negro, d*onde dice:

> Pensemos en un pavo que se alimenta todos los días. Cada vez que se le da de comer, el ave cree que la regla general de la vida es ser alimentado todos los días por amistosos miembros de la raza humana que "velan por sus intereses", como diría un político. En la tarde del miércoles anterior a Acción de Gracias, al pavo le ocurrirá algo ine*sperado.*

*N*ótese que aquí no tenemos el problema de una muestra demasiado pequeña. El pavo de la historia puede tener cientos de puntos de datos, hasta 364, y creer que son suficientes para demostrar que los humanos son realmente una raza benévola dedicada al bienestar de los pavos. Cada día que

se alimenta al pavo se refuerza esta creencia. El mismo problema existe con el cambio climático, donde el hecho de que el cambio sea muy lento lleva a la gente a una falsa sensación de seguridad. "La temperatura ha aumentado un poco", dicen algunos, "claro, ¿y qué? No nos ha pasado nada malo hasta ahora así que ¿por qué iba a cambiar?".

El problema, en estos casos, tiene un nombre: "punto de inflexión" (Gladwell, 2002); es algo típico de aquellos sistemas llamados "complejos" que tienden a pasar rápidamente de una condición a otra. Veremos más sobre estos sistemas en el siguiente apartado pero, por el momento, basta con señalar que son muy comunes en el mundo real. Volvamos a pensar en el pavo de la historia, el cual puede tener dos estados distintos y separados: un pavo vivo y un pavo muerto. Los mismos dos estados pueden darse para el conjunto de la humanidad cuando se enfrenta al cambio climático.

Nassim Taleb utiliza el término "cisne gris" para referirse a sucesos o condiciones extremas que nunca antes se habían experimentado pero que podrían haberse predicho estadísticamente. Un buen ejemplo de cisne gris es el tsunami de Tō*hoku que* azotó Japón en 2011. La ola del tsunami fue tan grande que superó las defensas costeras construidas sobre la hipótesis de que un evento así era demasiado improbable para ser considerado, sin embargo, no era imposible en base a los datos conocidos sobre los tamaños de los tsunamis históricamente hablando. Un caso diferente es el de los eventos totalmente fuera de la distribución estadística, verdaderos cisnes negros o "reyes dragón", como los ha denominado Sornette (2012). En estos casos, el sistema se comporta de una forma que no es predecible a partir de los datos históricos anteriores. No importa cuántas veces se pruebe un arma haciendo que el martillo golpee una recámara vacía, no se tendrán datos sobre lo que ocurre cuando el martillo golpea una bala. La transición entre un estado y otro encaja bien con el concepto del "precipicio de Séneca" que tratamos en este libro, y estas consideraciones se aplican también a las predicciones climáticas. En el fragor del debate, hay un punto que los críticos de la ciencia del clima casi siempre pasan por alto y que, a veces, también los partidarios. El problema es que los modelos actuales son limitados en cuanto a su capacidad de predecir eventos extremos. Es decir, no están hechos para prever la posibilidad de variaciones rápidas, inesperadas y catastróficas, el concepto descrito aquí en términos de "efecto Séneca".

Se nos ocurren muchas formas que los modelos no pueden describir para que el calentamiento global sea peligroso para la humanidad, incluso mortal. El aumento de las temperaturas podría provocar el colapso de grandes fracciones de los océanos de Groenlandia y de las capas de hielo de la Antártida, lo que generaría subidas realmente catastróficas de varios metros, incluso decenas de metros, en el nivel medio del mar. Luego, por supuesto, está el "grande" del cambio climático: el punto de inflexión que podría impulsar irreversiblemente el sistema climático de la Tierra a la condición conocida como "Tierra invernadero" (a veces "Tierra de efecto invernadero") con temperaturas medias de unos 5-8 °C más altas que las actuales, sin casquetes polares, sin glaciares continentales, con una subida del nivel del mar de decenas de metros, con una desoxigenación parcial de la atmósfera. En el pasado, estas condiciones provocaron enormes extinciones masivas y, en algunos casos, prácticamente la muerte de toda la ecosfera. El climatólogo James Hansen (2007) llegó a insinuar la posibilidad de un efecto invernadero desbocado que podría llevar a la Tierra a convertirse en un planeta similar a Venus: sin vida, con una atmósfera compuesta principalmente por CO_2 y ácido sulfúrico, y con temperaturas de cientos de grados centígrados (¡eso sí qu*e* sería un verdadero precipicio de Séneca!). Afortunadamente, el conocimiento actual de la física de la atmósfera terrestre indica que el escenario de Venus es poco probable, quizás imposible (Goldblatt y Watson, 2012). Pero el mero hecho de que existan estas posibilidades demuestra que podríamos estar jugando a la ruleta rusa con el clima de la Tierra.

Todo esto es bien conocido en el debate científico, pero los puntos de inflexión catastróficos brillan por su ausencia en el debate político. A veces se insinúa el riesgo, pero nunca se le presta toda la atención, probablemente, porque los científicos han temido ser tachados de catastrofistas si hacían públicas sus preocupaciones. Parece que han practicado una especie de autocensura que les hace evitar exponer sus peores preocupaciones en público (Antilla, 2010). Al menos hasta ahora, toda la discusión parece regirse por este tipo de autocensura y no sabemos qué podría pasar si el concepto de catástrofe climática consiguiera el centro del debate. Se dice que James Schlesinger dijo que "las personas solo tienen dos maneras de funcionar: la complacencia y el pánico" y no resulta obvio que pasar la discusión al modo pánico conduzca a las mejores opciones para evitar una catástrofe climática. Cómo nos las

arreglaremos para afrontar el problema, si es que alguna vez lo hacemos, es algo que está por ver.

En general, podemos aplicar a los modelos la cita de Shakespeare de Hamlet: "Sé tan casto como el hielo, tan puro como la nieve, no escaparás a la calumnia". Solo tenemos que cambiar algunos términos y obtenemos: "Sé tan preciso como el quinto decimal y tan exacto como más del 1%, no escaparás al hecho de que tu modelo es una aproximación".

POR QUÉ NO SE CREE EN LOS MODELOS: EL SÍNDROME DE CRESO

Se dice que el rey Creso de Lidia, que vivió durante el siglo VI a. C., consultó el oráculo de Delfos antes de embarcarse en una guerra contra el vecino Imperio persa. La respuesta de la sacerdotisa del oráculo, la pitonisa, fue: "Si invades Persia, destruirás un gran imperio". Creso lo tomó como una profecía favorable y procedió con sus planes de guerra. Pero la pitonisa no había especificado qué imperio sería destruido: resultó ser el de Creso.

Muchas historias antiguas nos parecen un poco tontas, incluida esta. ¿No podría haber sido Creso un poco más cuidadoso? Sí, pero el objetivo de estos relatos no es el de ser crónicas fieles de la historia real, sino que pretenden ser ilustraciones de la sabiduría humana o, quizá más a menudo, de la falta de ella. En el caso de la historia de Creso, probablemente, la idea era mostrar algunos errores comunes que la gente comete al planificar el futuro. Al tener que elegir entre diferentes resultados posibles de una determinada acción, la gente tiende a abrazar el más favorable: es una de las manifestaciones de lo que hoy llamamos "razonamiento motivado". Podemos llamar "síndrome de Creso" a la tendencia de las personas a verse afectadas por factores emocionales que las llevan a creer lo que les gusta creer.

No es difícil entender qué llevó a Creso a dejarse engañar de tal manera por la profecía. Pongámonos en el lugar del rey, cuando consultó el oráculo de Delfos, probablemente ya había reunido sus tropas: lanceros, arqueros, honderos, cuadrillas, catafractos, hoplitas, peltastas y cualquier persona armada con cuchillos de carnicero de gran tamaño o cosas similares a las que podía pagar para que lucharan por él. En ese momento, imagina que el oráculo le hubiera dicho a Creso algo así como "mira, amigo, los persas van a cortar tu ejército en pedazos y van a hacer de tu presencia real una hamburguesa bien

pasada" (que es, por cierto, exactamente lo que ocurrió). ¿Te imaginas a Creso saliendo de la hendidura de la roca de la pitonisa diciéndole a sus tropas: "Lo siento, amigos, todo ha sido un error. Por favor, disolveos y volved a casa"? No, lo único que podía decir a sus seguidores era "el oráculo me ha dicho que Dios está de nuestra parte", o algo así. La propaganda no es solo un invento moderno.

La historia de Creso y el oráculo de Delfos es principalmente una leyenda, pero seguramente no fue el único líder de la historia que no fue todo lo precavido que debía para llevar a cabo sus planes militares. Basta pensar en como Napoleón, y más tarde Adolf Hitler, pensaron que invadir Rusia en invierno era una buena idea. Para obtener un ejemplo histórico detallado de mala planificación militar, se podría leer el libro de Mario Cervi Las *legiones huecas (1*966), la historia de cómo el duc*e de* Italia, Benito Mussolini, empujó a Italia a la loca empresa de invadir Grecia en 1941. Todavía tenemos las actas de las reuniones del gabinete de Mussolini en las que se puede leer cómo el gran líder cometió el error letal de rodearse de aduladores que competían entre sí tratando de complacer al gran jefe sobreestimando la capacidad de lucha de las tropas italianas. Por su parte, Mussolini fue lo suficientemente estúpido como para creer en lo que le decían. El resultado fue que la capacidad de predicción del alto mando italiano de la época resultó no ser mejor que la del rey Creso, muchos siglos antes, y solo la intervención del ejército alemán obligó a los griegos a rendirse y salvó a los italianos de una completa humillación. Hay muchos más casos de increíbles errores estratégicos en acciones llevadas a cabo por líderes que, aparentemente, se dejaron llevar por su propia propaganda. Pero este tipo de errores es muy común en todos los ámbitos de la actividad humana: las empresas quiebran, la gente pierde su dinero, las familias se rompen y muchos más.

Vemos cómo las emociones juegan un papel importante en la forma en que vemos el futuro, y puede llevar a dejar de creer en los buenos modelos, al igual que a confiar en los malos. Ya vimos anteriormente como las personas tienden a apresurarse a juzgar sobre la base de la "ley de los números pequeños" descrita por Tversky y Kahneman (1971), demostrando que los factores emocionales seguramente desempeñan un papel importante a la hora de llevar a las personas a interpretar el futuro sobre la base de datos muy insuficientes. Pero pueden hacerlo incluso peor. Los mismos autores exploraron varias

formas de percepciones erróneas que afectan a la mente humana, Tversky y Kahneman (1974). Las principales son: representatividad, disponibilidad y anclaje.

La re*presentatividad es* la tendencia de las personas a juzgar sobre la base de estereotipos fundamentados en algún caso representativo. Por ejemplo, la imagen común de un profesor universitario es alguien con barba y gafas. De esta manera, cuando la gente ve a alguien con barba y gafas puede asumir que es un profesor universitario. A mí me pasa todo el tiempo: parece que encajo con la imagen de un profesor universitario. Pero se trata de una deducción basada en datos insuficientes: ¿y si fuera un traficante de drogas? Sin embargo, mis alumnos nunca sienten la necesidad de pedir mi identificación cuando se presentan en el aula para atender a mis clases. En siguiente lugar, la dis*ponibilidad sig*nifica juzgar solo sobre la base de la experiencia disponible. Por ejemplo, la mayoría de nosotros nunca ha experimentado un tsunami y, por tanto, tendemos a considerar que la frecuencia de este tipo de sucesos es menor de lo que realmente es, por no hablar de la posibilidad de que se alcance un punto de inflexión en el clima de la Tierra. Por último el anclaje, an*clar sig*nifica juzgar sobre la base de los datos disponibles (el ancla) independientemente de su significación. Una manifestación clásica de este error se da cuando hay un día especialmente frío y algunas personas parecen pensar que eso refuta el concepto de calentamiento global. En enero de 2019, tras una ola de frío especialmente dura en el Medio Oeste, el presidente Donald Trump tuiteó: “¿Qué demonios pasa con el calentamiento global?”. Probablemente, le pareció gracioso.

Pero quizás, la peor y más difusa razón del síndrome de Creso es el llamado “pensamiento de grupo” (gro*upthink).* Las personas no solo tienden a ser crédulas individualmente, sino que parecen estar afectadas por un peligroso fenómeno colectivo que provoca que los grupos sean aún más crédulos que los individuos. El término fue utilizado por primera vez por William H. Whyte Jr. en un artículo publicado en la revista For*tune en* marzo de 1952. Whyte extrapoló el concepto a partir de la definición de George Orwell del “doblepensamiento” en su famosa novela 198*4 (1*949), pero ambos conceptos son muy diferentes. Orwell definió el doblepensamiento como la capacidad de las personas de mantener dos puntos de vista diferentes y contradictorios sin ser capaces de darse cuenta de la contradicción (por ejemplo, no eres racista

pero no quieres que tu hija se case con un italiano). El pensamiento grupal, en cambio, es la incapacidad de mantener o expresar las propias creencias frente a las creencias opuestas de la mayoría del grupo al que se pertenece.

Whyte pudo haberse visto influenciado por una serie de estudios clásicos sobre el efecto de la presión social llevados a cabo por Solomon Asch a finales de los años cuarenta y principios de los cincuenta. Estas pruebas se conocen todavía hoy con los nombres de "paradigma de Asch" o "experimento de Asch" (Asch, 1955). Sus resultados fueron siempre consistentes: la mayoría de las personas tienden a modificar su comportamiento de forma que se evite crear desacuerdos dentro del grupo, ser señalados como alborotadores o, simplemente, hacer bulla. No todo el mundo está sujeto a la presión del grupo de la misma manera y Asch descubrió que algunas personas se defendían, mientras que otras simplemente se retiraban a una posición agnóstica. Pero podemos imaginar que cuando se forma un grupo con un propósito determinado, poco a poco se expulsará o marginará a los inadaptados y los que queden compartirán los principios básicos del grupo.

El pensamiento de grupo puede ser útil para garantizar una cierta coherencia en las acciones grupales y puede que no valga la pena que en el ocultismo exista el término "egregor" que indica una manifestación colectiva del pensamiento del grupo. El egregor no tiene necesariamente la connotación negativa del término "pensamiento de grupo", al contrario, puede indicar la capacidad del grupo de ir más allá de los límites de las personas individuales que lo componen. Sin embargo, el pensamiento de grupo puede provocar desastres si la mayoría sus miembros tienden a ser optimistas sobre el resultado de alguna misión. En ese caso, nadie querrá ser el agorero que lo estropee todo. Esta es otra forma del característico "efecto de retroalimentación" de los sistemas complejos. Cuanto más optimistas son las personas, más tienden a contagiar a otros de la misma positividad. Esto resulta especialmente cierto en el caso de los líderes, que tienden a controlar a sus seguidores aparentando confianza en el éxito de cualquier empresa en la que estén involucrados.

Existe otro tipo de uso indebido de los modelos basado en las emociones, que puede considerarse lo contrario del síndrome de Creso: la tendencia a sobrestimar las posibilidades de que un modelo se equivoque. A menudo adopta la forma del rechazo a las predicciones negativas y lo vemos en juego, particularmente, en el caso del cambio climático. En este campo, una reacción

común es burlarse de los resultados de los modelos climáticos y de los "alarmistas" que los difunden. Es algo que podríamos llamar "fatiga de la fatalidad", un síndrome que no parece haber sido estudiado cuantitativamente pero que es bien conocido. Un ejemplo es la historia del niño que gritó "lobo". Contada por Esopo, la historia reprocha al niño haber llamado al lobo demasiadas veces simplemente porque estaba aburrido, aunque es posible que solo se tratase de mala prensa y que el niño simplemente hizo lo que pudo, pero fue víctima de una racha especialmente desafortunada y, sobre todo, de la tendencia de la gente a no creer en las malas noticias.

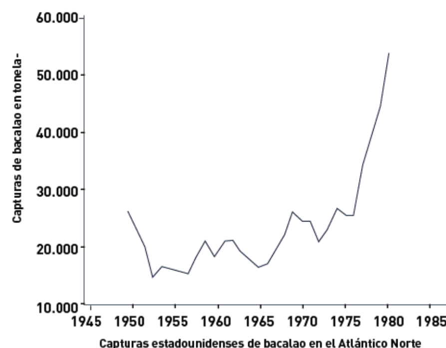
Merece la pena examinar con cierto detalle la historia de este niño. Supongamos que el niño da la alarma cada vez que ve algo que se parece a un lobo; por supuesto, la criatura podría ser simplemente una oveja oscura o un perro, pero el chico no quiere correr el riesgo de la llegada de un lobo de verdad. Los aldeanos conocen la incertidumbre de la tarea del niño y están preparados para unas cuantas falsas alarmas. Por eso, la primera vez que corren hacia la valla del pueblo y no encuentran ningún lobo, le dan una palmadita en la cabeza al chico y le dicen "sigue con tu tarea, chico, estamos contigo". Seguidamente, llega una segunda falsa alarma, los aldeanos corren a la valla y no hay lobo. "Está bien muchacho, pero trata de ser más cuidadoso, ¿quieres?". Después, la tercera noche, cuando ocurre, "bueno, muchacho, esto es algo extraño, ¿no? ¿Dices que había un lobo? ¿De verdad? No vimos ninguno. Deberías tener más cuidado antes de llamar a todos los aldeanos a la valla". Y entonces, llega una cuarta noche en la que las carreras hacia el cerco se quedan sin repuesta: no hay lobo. Llegados a este punto, alguien empieza a sospechar que el chico les está engañando de verdad. "¿Cómo explicas que hayamos corrido a la valla cuatro veces seguidas y que el lobo nunca haya estado allí? Chico, o te estás burlando de nosotros o trabajas para el lobo".

Pero es posible que el chico solo intentara hacerlo lo mejor posible. Una racha desfavorable de malas predicciones no es imposible y, a la larga, es inevitable. Supongamos que el chico acierta la mayoría de las veces, digamos que dos de cada tres (66%). No es un mal resultado pero, aun así, la probabilidad de que se produzca una racha de cuatro falsas alarmas seguidas es superior al 1%, y es algo que ocurrirá, tarde o temprano. Hay que tener en cuenta también que cuando los aldeanos lleguen, el lobo puede haber desaparecido y ¿qué prueba hay de que realmente lo había? No importa si el niño envía falsas alarmas o si solo son percibidas como falsas alarmas; en

algún momento, el cansancio de la fatalidad se apoderará de los pastores y probablemente pensarán que el chico los ha engañado. Lo despedirán y pensarán que el lobo, después de todo, no puede ser una amenaza tan seria. Hasta que el lobo venga de verdad.

Vemos este efecto en múltiples ocasiones cuando la amenaza es conocida pero sus manifestaciones están muy espaciadas en el tiempo. Los tsunamis, los huracanes y los incendios forestales son ejemplos de situaciones en las que los intervalos entre las catástrofes sosiegan a la población que tiene una falsa sensación de seguridad. De alguna manera, el hecho de que ningún huracán haya golpeado la ciudad durante muchos años, significa que la ciudad está a salvo de los huracanes y mucha gente se burlará de los agoreros que intentan decir que hay que tomar precauciones.

FIGURA 2
CAPTURAS DE LA PESCA DE BACALAO DEL ATLÁNTICO NORTE DE ESTADOS UNIDOS



Fuente: FAOSTAT.

La "fatiga de la fatalidad" se parece en varios aspectos al fenómeno llamado "la falacia del jugador", que lleva a algunas personas a jugar a la estrategia de la martingala que consiste en doblar la apuesta cada vez que se pierde, con base en el razonamiento de que si algo no ha sucedido hasta ese momento, entonces es más probable que suceda. La fatiga de la fatalidad cambia de signo en esta visión errónea de la probabilidad, asumiendo que si algo malo no ha ocurrido hasta ahora, entonces es más improbable (o quizás imposible) que ocurra alguna vez. Trasladado al debate del mundo real, se ve en muchos casos.

Considérense los datos que se presentan a continuación para la pesca del bacalao del Atlántico Norte de Estados Unidos (Hamilton, Haedrich y Duncan, 2004) (figura 2).

Imagínate que eres el director general de una empresa de pesca de bacalao:

estos resultados te parecerían estupendos. Lo más probable es que tu empresa haya seguido la tendencia general y haya conseguido duplicar su producción en pocos años. Esto es el resultado de la adopción de la nueva tecnología de "arrastre", que permite a los pescadores pescar bacalao en mar abierto y abrir un nuevo recurso que no estaba disponible para la gente que practicaba la pesca de bajura. Fue un gran momento para la industria; Hamilton, Haedrich y Duncan (2004) informan de que durante este periodo, en Canadá:

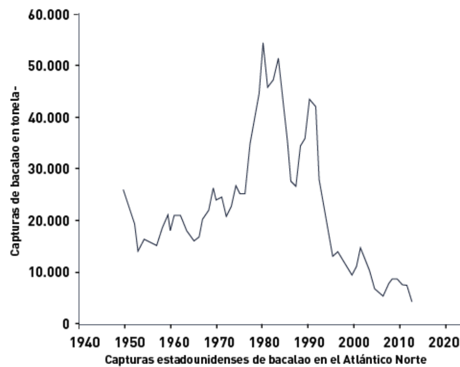
> En el momento álgido del crecimiento, los capitanes de los barcos de arrastre ganaban entre 350.000 y 600.000 dólares al año solo con el bacalao. Los marineros, muchos de ellos estudiantes de secundaria en los barcos de sus padres, podían ganar 50.000 dólares al año. El Gobierno federal ayudó a financiar las mejoras de las embarcaciones, concediendo subvenciones que cubrían el 30 y el 40% de su coste.

Pero algo estaba muy mal en esta abundancia: la industria pesquera estaba en pleno modo de sobreexplotación. Según un estudio realizado por Hamilton y sus colaboradores en 2004:

> [...] la principal transformación ecológica tuvo lugar durante los años álgidos de la pesca, no en su fase terminal. Cuando, a mediados de los años ochenta, algunos patrones de barcos de arrastre se dieron cuenta de que el bacalao era cada vez más pequeño y difícil de encontrar, se adaptaron recubriendo ilegalmente sus redes con mallas de menor tamaño (Palmer y Sinclair, 1997), capturando así a los alevines. Gracias a esta y a otras intensidades, las capturas de los últimos años se mantuvieron engañosamente altas a pesar de la caída de las poblaciones.

Finalmente, el agotamiento pasó factura y si se observan los datos de las capturas de bacalao hasta 2012, se puede ver que el precipicio de Séneca afecta a la pesca estadounidense. Del mismo modo, y la vez, este desastre se produjo en la pesca canadiense, produciéndose, incluso, un precipicio aún más pronunciado (Hamilton, Haedrich y Duncan, 2004) (figura 3).

FIGURA 3
CAPTURAS DE BACALAO DE LA PESCA DEL ATLÁNTICO NORTE



Fuente: FAOSTAT.

Obsérvese que no se hizo nada para intentar evitar el precipicio mientras las capturas crecían, aunque el Gobierno debía saber que los pescadores capturaban ilegalmente alevines. Solo cuando la producción empezó a caer, los Gobiernos intervinieron estableciendo moratorias y cuotas, pero ya era demasiado tarde: la población de bacalao no se recuperó y, en la actualidad, la industria pesquera del Atlántico Norte se dedica principalmente a la captura de invertebrados, como cangrejos y camarones.

Una vez más, los datos podrían haber dicho mucho a la industria pesquera si se hubieran interpretado en los términos de un modelo correcto del sistema. Sabiendo que la pesca estaba agotando las poblaciones de bacalao, estaba claro que cabía esperar algún tipo de declive, muy probablemente un precipicio al estilo Séneca, el modo típico de declive de las poblaciones biológicas. El comienzo exacto del precipicio no era exactamente predecible, pero no había duda de que se avecinaba. Evidentemente, algo falló en la percepción del sistema por parte de los responsables políticos, al menos en cuanto a lo que a las declaraciones públicas se refiere. Parece que los pescadores, en términos individuales, eran perfectamente conscientes de lo que ocurría, pero el letal mecanismo del pensamiento de grupo impidió que este conocimiento saliera a la luz y tuviera un efecto en las políticas.

Este es un problema importante con todos los modelos. Por muy bueno que sea el modelo, es inútil si no se cree en él. Normalmente, los modelos que dicen a las personas que tienen que cambiar sus costumbres son los más propensos a no ser creídos o a ser ignorados. Eso ocurre en particular con los modelos utilizados para el cambio climático, cuyos resultados se rechazan o se aceptan pero no se actúa en consecuencia. Quizá los científicos del clima tendrían más éxito si se pusieran una túnica de pitonisa y hablaran desde una

grieta entre las rocas, pero esto no se ha intentado por ahora.

BIBLIOGRAFÍA

AntILLA, L. (2010): "Autocensura y ciencia: una revisión geográfica de la cobertura mediática de los puntos de inflexión climáticos", Pub*lic Understanding Science, v*ol. 19, pp. 240- 256.

ArrHENIUS, S. (1896): "Sobre la influencia del ácido carbónico en el aire sobre la temperatura del suelo", Phi*losophical Magazine and Journal of Science, v*ol. 41, pp. 237-275.

AscH, S. E. (1955): "Opiniones y presión social", Sci*entific American, v*ol. 193, pp. 31-35.

BarDI, U. (2014): Los *límites del crecimiento retomados, M*adrid, Los Libros de la Catarata.

— (S. f.): "¿Dónde está la prueba de que el CO2 calienta la Tierra?, Cas*sandra's Legacy, h*ttps://cassandralegacy.blogspot.com/.

DesHMUKH, S. y MurTHY, J. (2014): "Nightfall: Can Kalgash Exist", Cornell University, arXiv:1407.4895.

EllEMBERG, J. (2008): "Cómo los mercados financieros cayeron en la martingala, una apuesta tonta de 400 años", Sla*te, h*ttps://bit.ly/3MX94RE.

ForRESTER, J. (1971): Din*ámica mundial, W*right-Allen Press, https://bit.ly/3zB3AJv.

— (1971): "COUnterintuitive behavior of social systems", Sim*ulation, v*ol. 16, pp. 61-76.

GlaDWELL, M. (2002): The *Tipping Point: How Little Things can Make a Big Difference, N*ueva York, Back Bay Books.

GolDBLATT, C. y WatSON, A. J. (2012): "The runaway greenhouse: implications for future climate change, geoengineering and planetary atmospheres", Phi*losophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences, v*ol. 370, pp. 4197-4216.

HamILTON, L. C.; HaeDRICH, R. L. y DunCAN, C. M. (2004): "Above and Below the Water: Social/Ecological Transformation in Northwest Newfoundland", Pop*ulation and Environment, v*ol. 25, pp. 195-215.

HanSEN, J. (2007): "Catástrofe climática", New *Science, v*ol. 195, pp. 30-34.

LasKAR, J. y GasTINEAU, M. (2009): "Existencia de trayectorias de colisión de Mercurio, Marte y Venus con la Tierra", Nat*ure, v*ol. 459, pp. 817-819.

LetZER, R. (2018): "Una teoría de la conspiración a la vez: los orejas planas no rechazan la ciencia del clima", Live*Science, 1*8 de abril.

MakARIEVA, A. M.; GorSHKOV, V. G. y Li, B.-L. (2009): "Precipitación en tierra frente a la distancia al océano: evidencia de un bombeo forestal de la humedad atmosférica", Eco*logical Complexity, v*ol. 6, pp. 302-307.

MeaDOWS ET *al. (*1972): Los *límites del crecimiento, N*ueva York, Universe Books.

MusA, G. (1964): "Terrestrizzazione", en Musa, G. y Cremaschi, I. (eds.), I L*abirinti del Terzo Pianeta, M*ilán, Nuova Accademia Editrice.

NorDHAUS, W. D. (1973): "World dynamics: Measurement without data", The *Economic Journal, v*ol. 83, pp. 1156-1183.

— (1992): "MODelos letales", Bro*okings Papers on Economic Activity, v*ol. 2, pp. 1-59.

PalYULIN, V. V.; CheCHKIN, A. V. y MetZLER, R. (2014): "Levy flights do not always optimize random blind search for sparse targets", Pro*ceedings of the National Academy of Sciences, v*ol. 111, pp. 2931-2936.

PapERT, S. (1980): Min*dstorms: Computers, Children, and Powerful Ideas, N*ueva York, Basic Books.

PhiLLIPS, D.; WelTY, W. y SmiTH, M. (1997): "Elevados niveles de suicidio asociados a la legalización del

juego", *Suicide and Life-Threatening Behavior*, vol. 27, pp. 373-378.

RUPPERT, M. C. (2004): *Crossing the Rubicon: the decline of the American empire at the end of the age of oil*, Canadá, New Society Publishers.

SALTELLI, A. (2002): "Análisis de sensibilidad para la evaluación de la importancia", *Risk Anal*, vol. 22, pp. 579- 590.

SHIELDS, L. B. E.; HUNSAKER, J. C. y STEWART, D. M. (2008): "Russian roulette and risk taking behavior", *The American Journal of Forensic Medicine and Pathology*, vol. 29, pp. 32-39.

SOLOW, R. (1956): "El cambio técnico y la función de producción agregada", *Quarterly Journal of Economics*, vol. 70, pp. 65-94.

SORNETTE, D. y OUILLON, G. (2012): "Dragon-kings: mecanismos, métodos estadísticos y pruebas empíricas", *European Physical Journal*, vol. 205, pp. 1-26.

TALEB, N. (2007): *El cisne negro*, Nueva York, Random House.

TURNER, G. (2008): "Una comparación de los límites del crecimiento con 30 años de realidad", *Global Environmental Change*, vol. 18, pp. 397-411.

TVERSKY, A. y KAHNEMAN, D. (1971): "La creencia en la ley de los números pequeños", *Psychological Bulletin*, vol. 76, pp. 105-110.

— (1974): "Judgment under uncertainty: heuristics and biases", *Science*, vol. 185, pp. 1124-1131.

WACK, P. (1985): "Escenarios: aguas inexploradas por delante", *Harvard Business Review*, https://bit.ly/3OimcCc.

ZAGORSKY, J. L. (2016): *Boletín de Economía*, vol. 36, nº 1, pp. 401-410.

2. LOS SISTEMAS COMPLEJOS Y LA CIENCIA DEL COLAPSO

Aplasta la montaña hasta convertirla en basura,
esparciendo la basura desde el amanecer hasta el anochecer,
con las poderosas piedras que acapara,
y la montaña,
como una vasija de barro
se desmorona,
con su fuerza
derrite la montaña
en una cuba de grasa de oveja.
Enheduanna (siglo XXIII a. C.), Shong Meador (2009)

SISTEMAS COMPLEJOS: LA IRA DE LA DIOSA

La sacerdotisa sumeria Enheduanna, que vivió durante el tercer milenio antes de Cristo, es la primera autora conocida de la historia. Gracias a algún tipo de milagro, no solo algunos de sus textos han sobrevivido hasta nuestros días, sino que incluso tenemos un retrato de la propia Enheduanna en un bajorrelieve en un disco de alabastro recuperado de las ruinas de la ciudad de Ur. Se puede apreciar que tenía una nariz fuerte, llevaba un atuendo elaborado y estaba en una postura evidente de autoridad como alta sacerdotisa.

Los textos de Enheduanna no se parecen nada a lo que estamos acostumbrados a llamar "literatura" hoy en día y su significado no es fácil de entender. Pero hay uno, normalmente referido como Ina*nna y Ebih (B*lack et *al.,* 2015), que podemos reconocer como el primer informe de una catástrofe ecológica en la historia, aunque visto con los filtros culturales de la época. En el relato, leemos como la montaña Ebih era una tierra exuberante y próspera, un verdadero paraíso de plantas y animales. Pero la diosa Inanna acusó a Ebih de "falta de respeto" hacia ella. Se tomó sus armas, voló al cielo y derribó a Ebih, "fundiendo la montaña en una cuba de grasa de oveja".

Como argumenté en el artículo "Inanna y Ebih: ¿un informe de una antigua catástrofe ecológica?" (Bardi, 2015), no es difícil ver en esta historia un relato de la escorrentía catastrófica del suelo fértil de una tierra sobreexplotada u objeto de un excesivo pastoreo. Se trata de un proceso que aún hoy en día continúa en las tierras que una vez habitaron los antiguos sumerios, hoy

llamadas Irak. En nuestros tiempos todavía tendemos a atribuir este tipo de desastres a entidades malignas, incluyendo dictadores, cábalas financieras, conspiraciones políticas, sectas religiosas y otras más. Por supuesto, no es posible demostrar que las fuerzas del mal no existen, como tampoco es posible demostrar que la diosa Inanna no existe, pero un enfoque probablemente más beneficioso para entender las catástrofes, es describirlas en los términos de la ciencia de los "sistemas complejos", entidades formadas por subsistemas que interactúan fuertemente entre sí. Se trata de una ciencia que puede decirnos que las catástrofes ecológicas del tipo de la que destruyó la montaña llamada Ebih son el resultado de la mala gestión del suelo fértil, una entidad frágil que puede ser fácilmente arrastrada por la lluvia.

La ciencia de los sistemas complejos es relativamente nueva, ya que las herramientas necesarias para desarrollarla no estuvieron disponibles hasta la segunda mitad del siglo XX. En épocas anteriores, las ciencias físicas estudiaban principalmente los sistemas que podían describirse con ecuaciones únicas, por ejemplo, el movimiento de un cuerpo en un campo gravitatorio. Pero eso no es posible en el caso de los sistemas complejos, en los que cada elemento se encuentra unido a varios otros con vínculos de intensidad comparable. Pensemos en un corrimiento de tierras: cada guijarro de un montón se mantiene en su sitio gracias a otros guijarros que lo rodean. Ahora imaginemos que una fuerza externa, tal vez un pie, pisa un guijarro, hace que este se desplace cuesta abajo, lo cual puede liberar más espacio para que otros guijarros se desplacen hacia abajo y, a su vez, cada nuevo guijarro que se desliza hacia abajo puede hacer que más de ellos empiecen a deslizarse, provocando finalmente un desprendimiento. Es un fenómeno llamado "retroalimentación". Este fenómeno no es difícil de entender, pero, en la mayoría de los casos, describirlo con una sola ecuación es simplemente imposible.

Un desprendimiento constituye un ejemplo de los efectos de la retroalimentación "potenciadora" (o "positiva"). Es una reacción del sistema que tiende a amplificar los efectos de una perturbación. Este tipo de retroalimentación puede generar colapsos espectaculares: así como un guijarro puede iniciar un desprendimiento, una cerilla puede desencadenar una explosión, un disparo puede iniciar una guerra y una paja puede romper la espalda de un camello, y hay muchos más ejemplos. También existe otro tipo de retroalimentación, llamada "de atenuación" o "negativa", que tiende a

estabilizar el sistema. Pensemos en un coche en marcha: cuanto más se intente acelerar, más actuarán la fricción y los efectos aerodinámicos para frenarlo. En general, podemos decir que las retroalimentaciones son los elementos definidores de un sistema complejo. Un sistema es complejo si, y solo si, muestra fuertes efectos de retroalimentación.

Todos los días nos enfrentamos a sistemas complejos: animales, personas, organizaciones, etc. No es difícil entender qué es complejo y qué no lo es: depende de si la reacción a las perturbaciones externas está dominada por la retroalimentación o no. Pensemos en una roca comparada con un gato. Una roca no es un sistema complejo: dale una patada y simplemente rodará hacia delante, la roca no tiene efectos de retroalimentación que aumenten el efecto de la patada. Así que se puede escribir una ecuación que describa el movimiento de la roca, teniendo en cuenta su masa y la fricción generada por su movimiento en el suelo. Pero si se le da una patada al gato, podrían producirse diversas reacciones, incluida la posibilidad de que Kitty se dé la vuelta y te muerda: ¡eso es retroalimentación! Ni que decir tiene que no existe una "ecuación del gato" que describa su comportamiento. De hecho, se podría decir que el mejor modelo de un gato es un gato.

La mayoría de los seres vivos son sistemas complejos, incluidos los seres humanos. Lo mismo ocurre con la mayoría de las estructuras sociales y económicas que crean los seres humanos: familias, tribus, empresas, Estados, ejércitos y similares. No hay ecuaciones sencillas que describan estos sistemas, que tienden a comportarse de forma inesperada y destructiva. En 2003, llevar la democracia a Irak parecía fácil al principio, pero el sistema reaccionó de forma inesperada (aunque, en retrospectiva, quizá no tanto). Así pues, los sistemas complejos son inquietos, nunca se detienen, siempre cambian. Tiemblan, vibran, oscilan, chocan y pueden colapsar y desvanecerse: es así y lo hacen porque están viv*os, e*n el sentido de que rebosan energía. Ningún sistema complejo puede hacer nada interesante si no dispone de energía: un gato sin energía metabólica es un gato muerto, y un gato muerto no es un gato. Y por eso los sistemas complejos son tan interesantes, fascinantes, incluso bellos, aunque a veces sean de una belleza que mata (¡pensemos en un tigre salvaje o en un huracán!).

Para entender qué es lo que hace que los sistemas complejos se muevan y, a veces, se colapsen, hay que profundizar en el asunto y conocer un poco la jerga

del sector. A continuación, se facilita una lista de los términos más comunes. Ninguno es difícil de entender y se debería tener al menos una idea de su significado. Aquí utilizo el término “sistema” con el significado de “sistema complejo”.

1. Est*ado: e*l conjunto de los parámetros que definen el sistema.
2. For*zamiento: u*na perturbación externa que tiende a cambiar el estado del sistema.
3. Ret*roalimentación: l*a forma en que un sistema complejo reacciona a una perturbación. Puede amplificar la perturbación (retroalimentación positiva o potenciadora) o atenuarla (retroalimentación negativa, de atenuación o estabilizadora).
4. Atr*actor: c*onjunto de parámetros (un “estado”) que un sistema tiende a alcanzar.
5. Hom*eostasis (re*s*iliencia):* la tendencia de un sistema complejo a mantener su estado permaneciendo cerca de un atractor incluso cuando es perturbado por forzamientos externos.
6. Cap*acidad de carga: e*l flujo máximo de energía que el sistema puede mantener durante mucho tiempo.
7. Sob*regiro: l*a tendencia del sistema a generar flujos mayores que la capacidad de carga.
8. Tra*nsición de fase: t*endencia de un sistema a saltar de un atractor a otro, a menudo de forma brusca.
9. Pun*to de inflexión: c*onjunto de parámetros que marcan el punto que llevará al sistema a saltar de un estado a otro pasando de un atractor a otro.
10. Cad*ena trófica: t*endencia de un sistema a estar formado por una cadena de elementos enlazados que intercambian energía entre sí.
11. Col*apso: t*ransición de fase que lleva a un estado de complejidad reducida, siendo normalmente rápida y abrupta.

La mayoría de estos términos están simplemente relacionados con conceptos de sentido común. Podemos empezar por el est*ado, e*l conjunto de los parámetros del sistema. En el caso de un ser vivo, los parámetros podrían ser el tamaño, la temperatura, las tasas de los procesos metabólicos y más.

Seguimos con el for*zamiento, q*ue es cualquier perturbación procedente del exterior que tiende a cambiar el estado del sistema, puede ser un empuje o tirón físico, campos gravitacionales o eléctricos, cualquier cosa que actúe sobre el sistema. Un sistema complejo reacciona a los forzamientos por medio de ret*roalimentaciones. C*omo su nombre indica, la retroalimentación es la tendencia de los elementos de un sistema a influirse mutuamente. Significa que los cambios en un elemento generados por un forzamiento afectarán a los demás elementos del sistema y no solo eso, también el elemento que inició la perturbación se verá afectado de nuevo. Cuando dominan las retroalimentaciones potenciadoras, el sistema puede expandirse, crecer, moverse e incluso explotar. Cuando dominan las retroalimentaciones de atenuación, se ralentizará, encogerá, volverá y se detendrá; a menudo, el resultado es que el sistema tenderá a alcanzar una condición de equilibrio cerca de un conjunto de parámetros llamado atr*actor. P*uede que llegue a esos parámetros y luego se quede más o menos ahí, o puede oscilar alrededor del atractor como lo hace un péndulo. Esta tendencia a moverse hacia un atractor y permanecer cerca de él se llama hom*eostasis. O*bsérvese que esta tendencia no suele ser el resultado de un intento consciente del sistema por alcanzar un determinado estado; se trata simplemente del hecho de que las retroalimentaciones de atenuación tienden a mantenerlo ahí. Pensemos en una bandada de pájaros volando: no hay ningún pájaro con rango de "general" que dé la orden "¡ahora, bandada!". Simplemente, si un pájaro se encuentra fuera de la bandada, probablemente se sentirá lo suficientemente incómodo como para volver a la seguridad del grupo. Se trata de una retroalimentación de atenuación que evita que la bandada se disperse, pasando a ser un montón de aves que vuelan de forma independiente. Pero ningún pájaro tiene en mente la bandada cuando la forma.

También se utiliza el término res*iliencia, t*omado de la ingeniería, que podemos definir como la capacidad del sistema para resistir el colapso. Obsérvese que la homeostasis no significa que un sistema complejo sea estático, sino que no *est*á en equilibrio, tal y como se define en física y termodinámica. Equilibrio significa que el sistema ha alcanzado una condición de energía potencial mínima: si se quiere, se puede decir que ha maximizado su entropía. Un gato muerto está en equilibrio, un gato vivo está en homeostasis. Los gatos vivos normalmente resistirán todos los intentos de

despellejarlos, no importa de qué manera. Quizá también recuerdes el concepto de “atractor extraño” mencionado en la primera película de la saga Par*que Jurásico. L*os atractores extraños implican que el sistema es “caótico” en el sentido de que nunca volverá exactamente al mismo conjunto de parámetros que había alcanzado en un momento determinado. Forma parte del campo llamado “caos determinista”, una fascinante rama de la física que a veces se define como “teoría del caos”. No es necesario entrar en detalles, basta con decir que muchos atractores no son extraños y que no es necesario que un sistema sea caótico para que sea complejo.

La población en los ecosistemas reales es un ejemplo del concepto de atractor. Tiene que haber un determinado nivel de población que sea óptimo para una determinada especie en función del alimento disponible. Es algo que llamamos la “capacidad de carga” del sistema. En biología, se define como “el tamaño máximo de la población que el medioambiente puede sostener indefinidamente”. En condiciones homeostáticas, la población nunca debería alejarse demasiado de ese número: si aumenta, los alimentos escasean y las hambrunas o las enfermedades hacen que se reduzca. Si se reduce, la abundancia de alimentos la hará crecer de nuevo. Así, vemos como las complejas características del sistema crean el atractor que, en este caso, toma la forma de un determinado nivel de población.

En la práctica, en los ecosistemas reales las cosas son mucho más complicadas que las pequeñas oscilaciones cercanas a la homeostasis. En lugar de acercarse suavemente a la capacidad de carga y permanecer siempre cerca de ella, las poblaciones pueden crecer tan rápido que “sobregiren” el límite de sostenibilidad de un gran factor. Pensemos en una epidemia de gripe en humanos: el virus de la gripe arrasa con la población en oleadas periódicas, su población nunca se estabiliza cerca de un atractor, alcanza rápidamente cifras enormes al infectar a la mayor parte de la población humana y luego se desploma porque no tiene más víctimas que infectar. La Madre Naturaleza, también conocida por el nombre de Gaia, está lejos de ser una diosa benévola y misericordiosa. Es más bien como la diosa Inanna descrita por la poetisa Enheduanna, una criatura despiadada que destruye montañas enteras. Gaia puede hacer lo mismo cuando destruye poblaciones enteras que han superado la capacidad de carga del ecosistema. Esta es otra de las características de los sistemas complejos: siempre devuelven las patadas y, a veces, las devuelven

con mucha determinación (los gatos también pueden morderte si les das una patada).

Las oscilaciones típicas de los sistemas complejos ya resultan bastante negativas cuando se ven desde el punto de vista de las criaturas (la humanidad) que tienen que pasar por ellas, pero las cosas pueden empeorar mucho si el sistema atraviesa un pun*to de inflexión. E*n este caso, el sistema no vuelve al atractor original, sino que se aleja irreversiblemente de él para estabilizarse cerca de un atractor diferente. El nuevo atractor puede corresponder a una condición de flujo de energía y complejidad mucho menor que la del atractor anterior; de ser así, tenemos un colapso verdaderamente desastroso: el precipicio de Séneca en su forma real.

Hay muchos ejemplos de ecosistemas destruidos por la explotación humana que no han vuelto a su estado original y probablemente no lo harán en mucho tiempo, si es que lo hacen. Por ejemplo, la destrucción de los principales depredadores del ecosistema oceánico, los peces, ha generado una verdadera explosión de las poblaciones de criaturas en la parte inferior de la cadena trófica, las medusas y los crustáceos, en su momento mantenidas a raya por los peces. Ahora, estas criaturas depredan a los peces recién nacidos, impidiendo que sus depredadores vuelvan a aparecer. El sistema se encuentra en una condición homeostática diferente: una que gira en torno a un atractor que existe con una población mucho mayor de medusas y una menor de peces. Y así, hoy en día, si te pica una medusa (técnicamente, un cni*dario) m*ientras nadas en el mar, ¡ya sabes que es porque el ecosistema marino es un sistema complejo!

Vemos así lo rico y variado que puede ser el comportamiento de los sistemas complejos. Es una consecuencia del hecho de que, en cierto modo, están "vivos". Tienen la característica básica de los seres vivos, la de ser "estructuras disipativas", un término inventado por Ilya Prigogine hace aproximadamente medio siglo. Prigogine (1968) utilizó el término "disipativo" para evidenciar que estos sistemas tienden a disipar energía. Para ser más precisos, no se trata tanto de la energía como de los "potenciales energéticos", término utilizado para las formas de energía que pueden disiparse. Ya sabemos lo que es la "tensión", es un potencial eléctrico; cuanto mayor es, más rápido tiende a disiparse, y eso puede ser peligroso. Si tocas un cable de alto potencial, el potencial se disipará a través de tu cuerpo, otro ejemplo de cómo los sistemas

complejos pueden matar. Pero si se disipa en condiciones controladas, alimentará aparatos, dispositivos electrónicos, motores eléctricos y mucho más.

Los potenciales eléctricos son solo uno de los muchos tipos de potenciales energéticos que podemos encontrar a nuestro alrededor: hay potenciales químicos, gravitacionales, termodinámicos, etc. A veces pueden medirse con unidades físicas y otras veces se definen cualitativamente, como cuando hablamos de que una persona tiene "atractivo sexual", refiriéndonos a su potencial reproductivo. Pero la existencia de potenciales energéticos que pueden disiparse es una condición necesaria para los sistemas complejos. Así, una planta es un sistema que disipa el potencial energético de la luz solar, un herbívoro es una criatura que disipa el potencial químico contenido en las plantas, un carnívoro disipa el potencial energético contenido en la carne de un herbívoro, una empresa es un sistema que disipa el potencial económico de los productos que vende, y existen muchos ejemplos más.

A menudo, los potenciales de energía se disipan a lo largo de una "cadena trófica", un concepto que proviene de la biología, pero que podemos aplicar a muchos otros tipos de sistemas. Significa que el potencial energético se disipa a lo largo de una cadena escalonada. Probablemente conozcas los versos de Jonathan Swift (On *Poetry: a Rhapsody [17*33]):

> Así, los naturalistas observan que una pulga
> tiene pulgas más pequeñas que en ella hacen presa;
> y estas tienen otras más pequeñas que las muerden,
> y así continúa ad *infinitum*.

*E*n biología, el elemento más alto de la cadena trófica (por ejemplo, los depredadores) se corresponde con el potencial más bajo en términos termodinámicos. Esto puede resultar un poco confuso, pero es solo una forma diferente de ver estas cadenas: son una cascada de estructuras de disipación. También podemos ver un sistema industrial como una cadena trófica: comienza con la industria extractiva que produce materias primas minerales, luego estas materias primas son procesadas por la industria manufacturera y transformadas en productos que finalmente son convertidos en basura por la industria de gestión de residuos. También en este caso, el principal producto final es el calor residual.

Los potenciales que sustentan la cadena trófica se suelen medir en términos

relativos según el concepto de EROI o EROEI, la energía retornada por la energía invertida, término introducido por primera vez por Charles Hall (Hall, Cleveland y Kaufmann, 1986), pero también mediante otros parámetros similares, como la "transformidad" planteada por Howard Odum (1988) más o menos en la misma época. El EROI también está relacionado con el concepto de "energía neta", el potencial energético que queda disponible después de una transformación. Estos conceptos se utilizan normalmente para evaluar la eficiencia de lo que llamamos una "tecnología de producción de energía", aunque debemos entender que la energía no se puede producir, solo se puede transformar. En cualquier caso, el EROI de, por ejemplo, una planta fotovoltaica se define como la energía que produce la planta a lo largo de su vida útil dividida por la energía necesaria para construir, mantener y, eventualmente, desmantelar la planta. Como debería ser obvio, cuando se trata de una empresa comercial, el EROI debería ser mayor que uno, si es posible, mucho mayor. Nadie querría construir plantas energéticas que produzcan solo la energía suficiente para pagar su construcción y mantenimiento: las plantas deben producir un exceso de energía que pueda venderse y proporcionar un beneficio al propietario de la planta.

Hay muchos estudios en la literatura científica sobre el EROI de las diferentes tecnologías energéticas y aquí estaría fuera de lugar entrar en los detalles del campo. Bastará con decir que los datos actuales nos dicen que las tecnologías renovables, como la fotovoltaica, tienen ahora un EROI comparable, o incluso mayor, que el de los combustibles fósiles (Raugei, 2019; Sgouridis, Bardi y Csala, 2016). Pero el EROI es mucho más que un parámetro comercial. Es un concepto fundamental en biología como medida de cómo las estructuras disipativas de un sistema complejo intercambian energía entre sí. Si una transformación tiene un EROI mayor que 1, significa que el nivel trófico implicado crece (absorbe más energía de la que disipa). Si, por el contrario, es inferior a 1, el nivel trófico se reduce. Esto se puede explicar con un ejemplo biológico: se puede ver a un león como una máquina que transforma gacelas en más leones comiéndolas y reproduciéndose después. Ahora bien, un león reúne energía comiendo gacelas, pero debe gastar energía para perseguirlas. Si la energía que gasta el león es mayor que la que obtiene, entonces la bestia tiene un EROI menor que 1 y debe morir de hambre, y el tamaño de la manada se reducirá. Si es mayor que 1, tiene la posibilidad de reproducirse y aumentar el número de leones de la manada. En general, el EROI de las

transformaciones que intervienen en el sistema debería mantenerse cercano a 1, aunque es probable que oscile.

La línea que une el EROI y las cadenas tróficas no es más que la entropía haciendo su trabajo de aumentar todo el tiempo, como debería hacer según el segundo principio de la termodinámica. Esa es la forma en que se mueve el universo, el mecanismo básico y único que hace que las cosas se muevan: los potenciales se acumulan y luego se disipan, a veces muy rápidamente. Es otra forma de decir que nada caería si no hubiera subido antes. El hecho de que la caída tienda a ser rápida es una manifestación del principio llamado "de máxima producción de entropía" (MPE) (Roddier, 2012). La producción de entropía puede verse como otra forma de afirmar que los potenciales de energía se disipan.

El principio MPE es fundamental para lo que estamos discutiendo aquí: nos dice no solo que la energía tiende a disiparse, sino que tiende a disiparse ráp*idamente, y* ese es el origen de todos los colapsos. Esto es obvio cuando se piensa en el alpinismo, en la marcha con cuerda o en actividades similares que implican el riesgo de caer desde la altura de un potencial gravitatorio. Es un poco menos obvio cuando se trata de sistemas que, normalmente, no se supone que vayan a derrumbarse, por ejemplo, los Gobiernos y las grandes empresas. Pero hay una profunda similitud entre escalar una montaña y hacer crecer un imperio: en ambos casos, se acumula un gran "potencial energético". Cuando se escala una montaña, se acumula energía gravitatoria, cuando surge un imperio se acumula energía económica en sus estructuras de gobierno. Todos estos sistemas están sometidos al principio MPE y pueden pasar por fases rápidas de disipación de energía, evento que llamamos "colapso". Estos son los principios básicos de la termodinámica que explican por qué "la ruina es rápida", como señaló Séneca hace tiempo.

El principio MPE es un concepto bastante abstracto que no nos indica el mecanismo real del colapso, sino que es el resultado de la estructura en red del sistema. Como veremos con más detalle en el próximo capítulo, los elementos de un sistema complejo están vinculados entre sí y "hablan" entre sí. En un colapso, cada elemento que empieza a moverse en una determinada dirección arrastra consigo a otros elementos y el resultado suele ser una cascada de efectos que van todos en la misma dirección. Es lo que yo llamo la "crisis de Séneca", también conocida por William Shakespeare cuando dijo que "cuando

las penas vienen, no vienen solas, sino en batallones", es decir, los elementos del sistema que se derrumban parecen agruparse, aparentemente con ese mismo propósito. Pero no hay ningún propósito inteligente en los sistemas complejos: es simplemente la forma en que funciona la naturaleza. En la versión más sencilla del concepto de la crisis de Séneca, todo lo que se necesita es una cadena trófica de tres elementos que interactúen entre sí; el sistema central de la cadena puede colapsar muy rápidamente debido a la acción de los otros dos, como describo en mi anterior libro utilizando el formalismo de la dinámica de sistemas (Bardi, 2017).

Dicho esto, los sistemas complejos pueden adoptar una variedad desconcertante de estructuras: una cadena trófica puede estar compuesta solo por unos pocos elementos que interactúan: pensemos en un mercado donde se vende un único producto en régimen de monopolio. O puede estar compuesta por miles de elementos: pensemos en un ecosistema forestal. En todos los casos, las retroalimentaciones que se producen en las interacciones entre los elementos pueden agruparse para empujar el sistema al cielo o para arrastrarlo al infierno. Veremos este comportamiento en detalle en los próximos capítulos, por el momento, basta con recordar que el cambio generado por la retroalimentación es la característica típica de los sistemas complejos y que este cambio puede llevar al sistema a explotar, romperse, desmoronarse, colapsar, tambalearse, agrietarse, evaporarse y más. Así funciona el universo: el colapso no es un error, es una característica.

EL PODER DE LAS REDES: EL FANTASMA DENTRO DEL CAPARAZÓN

En 1803, el científico italiano Giovanni Aldini intentó, por primera vez en la historia, revivir a un muerto mediante la electricidad (Montillo, 2013). Aldini era sobrino de Luigi Galvani (1737-1798), conocido, entre otras cosas, por haber observado cómo los músculos de una rana muerta podían contraerse mediante una corriente eléctrica. Aldini llevó la idea de su tío varios pasos más allá, probándola en el cadáver reciente de un criminal ahorcado. Ni que decir tiene que el muerto no volvió a la vida, nada se produjo más allá de una espantosa contracción de sus músculos cuando Aldini pasó la corriente por su cuerpo. El único resultado a largo plazo de este intento puede haber sido el que inspirase a Mary Shelley para su novela Fr*a***nkenstein** (1818).

El intento de Aldini, al igual que la novela de Shelley, puede entenderse como parte de la visión cultural general de su época, cuando la biología moderna había empezado a lidiar con una cuestión fundamental: ¿qué hace que los seres vivos estén vivos? En la Antigüedad, era habitual pensar que los seres vivos tenían algo en su interior, una fuerza interna, un "fantasma dentro del caparazón" que les hacía moverse, cambiar, crecer y hacer todas las cosas que hacen los vivos y que no hacen los muertos, salvo en las películas de zombis.

La idea derivó probablemente de la observación de que los seres vivos respiran y que cuando dejan de respirar también dejan de estar vivos. Así, el movimiento de los pulmones se consideró generado por la presión interna de algo llamado ani*ma en* latín, término relacionado con el griego de áne*mos, q*ue significa 'viento', y que hoy traducimos en español como alma. E*l* término latino, ani*ma, s*e incorporó entonces al concepto de animal, literalmente algo que tiene alma, aunque hoy en día tendemos a utilizar el término "alma" de una manera más abstracta y orientada a la religión.

La idea de que los seres vivos tienen alma se denomina "vitalismo"; comenzó a encontrarse con dificultades cuando los biólogos empezaron a diseccionar cuerpos de animales y humanos, actividad que se popularizó en Europa con el Renacimiento. A pesar de todos los esfuerzos, no se pudo encontrar nada en el interior que se pareciera a un alma. Muchos intentaron identificar el alma con uno u otro órgano humano, siendo especialmente populares el hipotálamo y la hipófisis, pero eso no llevó a ninguna parte, ya que se fue descubriendo que estas glándulas tenían propósitos específicos no relacionados con el concepto de alma. Había algo más que hacía vivir a los seres vivos, pero ¿qué? No era una pregunta fácil de responder y el vitalismo siguió siendo una idea popular durante todo el siglo XIX, e incluso después. Hoy en día aún lo es, aunque se haya abandonado en gran medida en los círculos científicos.

La forma de ver esta cuestión en la actualidad está relacionada con lo que vimos en el apartado anterior: los seres vivos son sis*temas complejos y p*resentan todas las características no lineales asociadas a estos. Así pues, el hecho de estar vivo constituye una "propiedad emergente" de un sistema complejo. Significa que no existe un fantasma en el caparazón: es el conjunto el que confiere al sistema las propiedades que lo hacen complejo y hay más:

esta característica es propia de los sistemas que llamamos "redes", solo las redes pueden ser sistemas complejos.

Pongamos un ejemplo: imagínate que eres una hormiga. Vives en un hormiguero, una red de hormigas individuales, cada una de las cuales interactúa con otras hormigas, de una en una. Como hormiga, eres casi ciega, pero tienes un excelente sentido del olfato y la mayoría de tus entradas sensoriales son fer*omonas, m*oléculas de señalización que recibes de tus hormigas hermanas y que luego les retransmites.

El intercambio de feromonas hace que las colonias de hormigas dirijan a sus miembros en varias direcciones para buscar comida. Las hormigas también muestran una gran variedad de comportamientos: pueden atacar a otras colonias, alejarse de su lugar de origen, reproducirse creando otras colonias y comportarse de otras formas fascinantes. Sin embargo, la colonia no tiene una estructura de la que pueda emanar la toma de decisiones, un cerebro de algún tipo (por no decir que tenga alma). En la ficción, las hormigas reina y las hormigas soldado pueden ser humanizados como se puede ver en películas como Ant*z (1*998) pero, en el mundo real, ni las reinas ni los soldados gobiernan la colonia de hormigas. El complejo comportamiento del hormiguero es el resultado de las interacciones colectivas de las hormigas entre sí. Todas las hormigas obreras son iguales y ninguna hormiga tiene en mente el hormiguero, ninguna hormiga percibe siquiera su existencia. La colonia es una pro*piedad emergente de* una red de hormigas.

Una propiedad emergente no es algo material, es algo que percibimos como un patrón. Haz una prueba sencilla: utiliza un lápiz para dibujar un cuadrado en un papel. Ahora, míralo. Lo que ves son partículas oscuras de grafito en la superficie blanca de la hoja. Ninguno de estos trocitos de grafito es un cuadrado ni tiene nada que ver con un cuadrado. El cuadrado es una propiedad emergente del conjunto de estas partículas de grafito.

Las sociedades formadas por seres humanos tienden a generar patrones emergentes de todo tipo, pero los seres humanos por sí solos pueden no ser capaces de entenderlos con exactitud. Si te preguntara por el equivalente del hormiguero para los humanos, tu país, no podrías describir más que algunos rasgos del mismo. Italia, por ejemplo, es una península montañosa en medio del mar Mediterráneo que, debido a algunas peculiaridades de la historia geológica, parece una bota. Tiene unos sesenta millones de habitantes, que

hablan un idioma llamado "italiano", pero que parece ser insuficiente para transmitir lo que quieren decir, ya que tienden a gesticular mucho. Les gusta comer cereales en forma de un pan redondo llamado "*pizza*" y así podríamos seguir con muchas cosas raras que suelen hacer los italianos, pero todo lo que podrías contar sobre Italia sería siempre un reflejo muy pequeño de la increíble complejidad de una entidad formada por decenas de millones de seres humanos.

En la práctica, aparte de los datos que aprendiste en la escuela, tu percepción del país en el que vives está formada, en gran medida, por los contactos que tienes con otros seres humanos: en este sentido, no eres tan diferente de una hormiga. En el caso de los humanos, estos contactos implican principalmente señales verbales y visuales, no olfativas como en el caso de las hormigas, pero el mecanismo de transmisión y retransmisión es el mismo: estás continuamente expuesto a señales de tus congéneres, en persona o mediante tecnologías como los medios de comunicación o las redes sociales, y elaboras y retransmites continuamente estas señales a otros humanos. Fuera de este ámbito de las interacciones entre pares, la mayoría de los humanos probablemente ven su ciudad, su país o el Estado del que son ciudadanos principalmente como patrones creados por simples mensajes relacionados con la defensa y el ataque. Podemos decir "con razón o sin ella, es mi país", tal vez podamos emocionarnos escuchando el himno nacional mientras la bandera ondea al viento y, en algunas ocasiones, podemos sentir que es nuestro deber cargar armados con una bayoneta contra un nido de ametralladoras. Todo eso se hace en nombre de una entidad nebulosa llamada "país" formada por un número muy grande de entidades, individuos, familias, asociaciones, empresas, ciudades, edificios y mucho más.

El comportamiento de la inmensa red definida como país se genera mediante ráfagas transitorias de señales de refuerzo que pueden generar reacciones colectivas rápidas, incluso violentas, por parte de toda la colonia humana. Sin duda, a diferencia de la colonia de hormigas, la colonia humana (también llamada "Estado") tiene una especie de cerebro, se llama "Gobierno" o, a veces, "nuestro amado líder". Pero resulta dudoso que esta entidad pueda hacer mucho para dirigir la colonia humana hacia un comportamiento inteligente. Los Estados exploran su entorno, compiten por los recursos, a veces luchan entre sí, en ocasiones de forma muy destructiva. Pero estos son

comportamientos que las colonias de hormigas también realizan.

Así, las sociedades humanas, las colonias de hormigas y otros sistemas formados por muchas entidades enlazadas se entienden mejor si se ven como redes. La ciencia de las redes, al igual que la de los sistemas complejos, ha hecho grandes avances en los últimos tiempos y ambos conceptos están estrictamente relacionados: ningún sistema puede ser complejo si no es una red y muchas —aunque no todas— son sistemas complejos.

Antes de profundizar en el asunto, debemos aprender un poco de la jerga del campo de la ciencia de las redes. A continuación, una lista de los términos más relevantes utilizados.

- Gráfico: conjunto de objetos en el que algunos o todos los pares de objetos están conectados entre sí.
- Red: gráfico dinámico cuyos elementos intercambian energía, materia o información.
- Nodo (también vértice o punto): uno de los objetos que forman un gráfico.
- Enlace (también arista): la conexión entre dos nodos.
- Tamaño: el número de nodos de una red.
- Densidad: relación entre el número de enlaces reales y el total de enlaces posibles.
- Grado: el número de enlaces a un nodo, definido también como una media entre todos los nodos.
- Coeficiente de agrupamiento: la relación entre los enlaces reales que conectan a los vecinos de un nodo entre sí y el número máximo posible de dichos enlaces. También se define como una media entre todos los nodos.
- Longitud de ruta: el menor número de pasos necesarios para conectar un nodo con otro nodo. También se define como la característica de la longitud media de ruta de toda la red.
- Topología de la red: la forma en que los nodos están conectados entre sí.

Como se puede ver, el campo de la ciencia de las redes es rico en conceptos y los términos enumerados anteriormente son solo algunos de los muchos

parámetros que se pueden definir en la ciencia de las redes. Como ejercicio, apliquemos estos conceptos a una colonia de hormigas. En este caso, un grá*fico ser*ía una instantánea del hormiguero, mostrando una imagen de todas las hormigas y las cámaras subterráneas. Los nod*os del hormiguero son*, obviamente, cada una de las hormigas. Los enl*aces son* las conexiones que las hormigas realizan entre sí al intercambiar señales de feromonas. El conjunto de estos elementos forma la red del hormiguero, cuyo tam*año es* igual al nú*m*ero total de hormigas. En un momento dado, solo algunas hormigas están conectadas con otras, por lo que la densidad de la red es bastante baja, al igual que el coe*ficiente de agrupamiento: l*as hormigas parecen ponerse en contacto entre sí solo por parejas. Pero las hormigas se mueven y, en principio, cada hormiga puede conectarse con cualquier otra, por lo que se dice que la top*ología de* esta red está ‟totalmente conectada”. O*t*ras redes tienen nodos inmóviles y pueden no estar totalmente conectadas. En un cerebro humano, por ejemplo, cada neurona está conectada a un número limitado de neuronas cercanas y este tipo de red debería denominarse ‟retícula”. Una señal de cualquier neurona puede llegar a cualquier otra neurona del cerebro, pero no directamente, sino que tiene que saltar de neurona en neurona.

Las redes reticulares y totalmente conectadas forman parte de una notable fauna de disposiciones topológicas que puede resumirse como se muestra aquí (¡una lista incompleta!).

- Red *conectada: c*ada nodo de la red está conectado a cualquier otro nodo mediante una ruta de enlaces.
- Red *reticular: l*os nodos están conectados solo con sus vecinos cercanos en el espacio.
- Red *aleatoria (ta*mbién conocida como re*d Erdös-Rényi):* cada nodo está conectado al azar con otros nodos.
- Red *de mundo pequeño: l*os nodos están conectados en su mayoría a nodos cercanos, pero también a algunos remotos.
- Red *libre de escala: s*imilar a la red del mundo pequeño, pero la probabilidad de una conexión puede describirse en términos de una ‟ley potencial”.
- Red *totalmente conectada: c*ada nodo está directamente conectado con todos los demás.

- Red *celular: l*os nodos se organizan en "celdas" donde la conexión entre nodos es más frecuente, las conexiones entre diferentes celdas son más raras.

Como última observación general, hay que señalar que existen redes virtuales y físicas. Una red virtual existe en el espacio virtual con los nodos que intercambian información entre sí, normalmente la red es generada por un ordenador digital. Una red real es un conjunto real de objetos físicos que intercambian energía entre sí; podemos decir que también intercambian información pero, en cualquier caso, el transporte de información de un nodo a otro requiere energía. Un ejemplo de redes virtuales y reales acopladas es el de la World Wide Web e Internet. Estos dos términos se utilizan a veces indistintamente, pero no son lo mismo.

El punto interesante, aquí, es cómo las redes pueden generar un comportamiento complejo. La red puede adoptar la forma de una reordenación de las conexiones, una variación de su número, una ampliación del tamaño, etc. Las redes también pueden colapsarse y, en este caso, pueden perder rápidamente un número de conexiones o de nodos, o ambos. El colapso puede significar que parte de la red se "evapora" dejando una red más pequeña, o la red puede romperse en dos o más redes más pequeñas no conectadas entre sí.

Como puedes imaginarte, hay una gran variedad de fenómenos que conducen a este comportamiento y no todas las redes son sistemas complejos. Algunas redes son simples disposiciones mecánicas de elementos y muestran un comportamiento lineal. Pensemos en un reloj mecánico: es una red en el sentido de que es un sistema de engranajes (nodos) vinculados entre sí que transfieren energía desde un muelle (o un peso) hasta las agujas de la esfera. Seguramente, un reloj tiene algo relacionado con el concepto de sistema complejo tal y como lo definimos en el capítulo anterior: disipa un potencial energético, el almacenado en el muelle. Pero eso no lo convierte en un sistema complejo. Lo mismo ocurre con los numerosos mecanismos y robots utilizados en la fabricación y el control de procesos: están diseñados para funcionar como sistemas lineales. Un brazo mecánico que trabaja en una cadena de montaje debe comportarse —y normalmente lo hace— de forma lineal, predecible y fiable: sin puntos de inflexión, sin transiciones de fase, nada parecido al comportamiento variado e inexplicable de un sistema complejo.

Esto no significa que estos robots sean siempre inofensivos: algunos matan a personas por error, como en el caso de Robert Williams, posiblemente el primer ser humano de la historia asesinado por un robot, un brazo mecánico en la fábrica donde trabajaba. Pero incluso los robots militares, posiblemente los más sofisticados que existen en la actualidad, se supone que son herramientas en lugar de entidades independientes.

En la práctica, no necesitamos una gran sofisticación mecánica para crear una red con un comportamiento típico de los sistemas complejos. Como ejemplo, pensemos en un dispositivo muy sencillo: el reloj de arena. Antes de la era de los relojes mecánicos, la gente tenía varias formas de medir el tiempo. Uno de los primeros dispositivos en hacerlo fue el reloj de agua, llamado también "clepsidra", nombre poético que significa 'ladrón de agua' en griego. A finales de la Edad Media se desarrolló el reloj de arena, más preciso y fácil de manejar que la clepsidra. Los granos de arena se comportan como los coches a la entrada de una autopista o como las personas en la caja de un supermercado: no importa lo larga que sea la cola, la tasa de rendimiento no cambia (Mills, Day y Parkes, 1996).

Como máquinas de medir el tiempo, los relojes de arena son dispositivos lineales. Pero hay una característica no lineal de los relojes de arena en la que nadie había reparado o, al menos, escrito hasta hace poco: las avalanchas en el depósito inferior. Si alguna vez has observado un reloj de arena en acción, es probable que te hayas quedado fascinado, o incluso hipnotizado, por la manera en la que la arena que cae forma un montón que crece, alcanza cierta altura y luego se derrumba en una pequeña avalancha. El proceso se repite mientras haya arena bajando desde el depósito superior. Si dedicamos un tiempo a observar, nos daremos cuenta de que las avalanchas pueden ser grandes o pequeñas, y parecen producirse de forma aleatoria.

Nadie había estudiado las propiedades estadísticas de las avalanchas en una pila de arena hasta la década de los ochenta, cuando el físico danés Per Bak y sus colegas, dos investigadores postdoctorales, Chao Tang y Kurt Wiesenfeld, trabajaban en el laboratorio nacional de Brookhaven. Habían estado desarrollando un modelo de un sistema de osciladores acoplados, algo que podría haber sido relevante para la física del estado sólido, pero, en un momento dado, comprendieron que su modelo podía describir las avalanchas que se producen en un montón de arena. Fue una idea de *marketing*

*in*teligente: el modelo era el mismo, pero la mayoría de la gente puede entender las avalanchas mucho mejor que la física del estado sólido.

Bak, Tang y Wiesenfeld publicaron sus ideas en 1988, proponiendo el concepto que denominaron "criticalidad autoorganizada" (SOC). Fue el nacimiento del modelo de la pila de arena, o modelo BTW, por las iniciales de los autores. Se hizo muy conocido y fue popularizado por Al Gore en su libro Ear*th in the Balance (19*92) y por el fascinante libro del propio Per Bak, ambiciosamente titulado How *Nature Works (1*996). El interés de este modelo no tiene tanto que ver con la forma en que podría describir los desprendimientos de arena: los desprendimientos reales no siempre generan avalanchas con la frecuencia que predice el modelo BTW; el interés radicaba en que podía aplicarse a una variedad de fenómenos, incluidos los terremotos y las guerras. Los científicos encontraron fascinante el concepto de criticalidad autoorganizada: una de las características de los seres vivos es vivir siempre "en equilibrio", deslizándose siempre por una avalancha pero sin dejarse vencer por ella, como los surfistas que cabalgan una ola. El hecho de que un modelo tan sencillo pudiera captar esta característica fue notable.

Entonces, ¿cómo funciona el modelo BTW? Considera que la pila de arena es una red que puede representarse como un tablero de ajedrez. Cada casilla del tablero es un nodo y está vinculada a cuatro vecinos cercanos. En el modelo, se supone que cada casilla se llena gradualmente con un número creciente de granos de arena virtuales "caídos del cielo" en casillas aleatorias de la cuadrícula. El número máximo de granos que puede contener cada cuadrado es fijo, digamos que es igual a tres. Cuando un cuadrado recibe un cuarto grano, se "colapsa", es decir, derrama los cuatro granos que contiene a los cuatro cuadrados vecinos. Entonces, uno o más de estos cuadrados pueden colapsar a su vez porque ya contenían tres granos. Los granos sobrantes se derraman a las casillas vecinas y el resultado puede ser una avalancha que se extiende por la red 2D hasta que todos los granos virtuales sobrantes se posan en algunas casillas que no están críticamente llenas o se "caen" del borde de la cuadrícula del tablero de ajedrez. Cuando se ejecuta el modelo, se puede registrar el número de avalanchas y su tamaño (el número de granos implicados).

Ahora viene lo interesante: el tamaño de las avalanchas generadas por el modelo BTW parece aleatorio a primera vista, pero no lo es. Resulta que las

avalanchas grandes son menos frecuentes que las pequeñas y que existe una relación bien definida (llamada "ley potencial") entre el tamaño y la frecuencia de las avalanchas. El tamaño es proporcional a la frecuencia elevada a un exponente variable, que también puede expresarse como "elevado a la potencia de un exponente", de ahí el nombre de ley potencial. Significa que las avalanchas grandes son más raras que las pequeñas, pero la probabilidad de que se produzca una avalancha de cierto tamaño depende del exponente de la ecuación.

La ley potencial también se denomina ley de la "cola gruesa" para indicar que los eventos extremos (la cola de la distribución) no son tan raros como en otras distribuciones estadísticas, como la curva gaussiana común. Estas relaciones también se denominan "ley de Pareto", por el economista suizo del siglo XIX Vilfredo Pareto, que la propuso por primera vez en 1895 para la distribución de la renta en Suiza (Pareto, 1967). Probablemente hayas oído hablar de la ley de Pareto en su forma simplificada, llamada a menudo "ley 80/20", habitualmente referida a casos prácticos: se puede oír que en una empresa el 80% del trabajo lo hace el 20% de los empleados; o que en la guerra, el 80% de los combates son librados por el 20% de los soldados. El propio Pareto propuso esta relación 80/20 al examinar la distribución de la tierra entre los propietarios en Italia, diciendo que el 80% de la tierra es propiedad del 20% de los propietarios. Pero eso no significa que la regla del 80/20 sea una ley exacta, es una aproximación que da una idea de este tipo de fenómenos. Por ejemplo, Jordi Prats (2011) informó en el blog de la American Statistical Association de que:

> En el negocio del libro en Estados Unidos, en lugar de la regla del 80/20, encontramos la regla del 97/20, es decir, el 97% de las ventas son realizadas por el 20% de los autores. Las ventas de libros de no ficción en Estados Unidos están aún más desequilibradas, ya que el 0,25% de los libros representan el 50% de las ventas. En Canadá, un 0,8% de los libros genera el 60% de los ingresos de las librerías.

Estos datos podrían decirnos algo sobre el número de ejemplares que podría vender un libro que tratara sobre el colapso, y eso podría desanimar un poco al autor. Pero podría ser peor: existe otra versión de la ley, a veces llamada "ley de Sturgeon" por el nombre del escritor de ciencia ficción Theodore Sturgeon (1918-1985). La ley de Sturgeon se expresa a veces como "el 99% de todo es basura" o, en su forma más dura, "el 99,9% de todo es

basura”. Es la misma idea que la ley de Pareto, pero un poco más extrema. Aparte de los números, estas leyes nos dicen que los acontecimientos grandes son mucho menos probables que los pequeños.

Resulta que al universo le gustan las leyes potenciales y muchos fenómenos comunes pueden explicarse mediante el concepto de criticalidad autoorganizada. Una característica del modelo BTW y de otros modelos similares es que la ley potencial no está escrita en ninguna parte del programa que gestiona el modelo, y no parece que sea posible derivar la ley potencial de la estructura del modelo salvo mediante la ejecución del programa y el registro de los resultados. En otras palabras, a pesar de que los programadores lo saben todo sobre el sistema que han creado, no pueden derivar la existencia de la ley potencial de las líneas de código que han escrito. En este sentido, podemos decir que la ley potencial es una propiedad “emergente” del sistema. Es decir, es una característica colectiva del sistema que no reside en ninguna parte de las propiedades de los nodos individuales, al igual que el hormiguero no está codificado en el cerebro de las hormigas individuales.

Todo esto tiene una relevancia inmediata cuando pensamos en términos de colapsos. Imaginemos que el montón de arena virtual del modelo BTW está habitado por criaturas virtuales que periódicamente son aniquiladas por las avalanchas. Tratarían de aprender lo que pudieran sobre estas catástrofes que las golpean, aparentemente de forma aleatoria, y pronto aprenderían que existe una ley potencial que relaciona la probabilidad de acaecimiento de las avalanchas con su tamaño. También aprenderían que las zonas del arenal en las que ya hay varios cuadros con 2 o 3 granos son peligrosas. No serían capaces de predecir dónde se producirá la próxima avalancha ni su tamaño exacto, pero el modelo les daría una idea de qué esperar y dónde, lo cual les permitiría tomar precauciones. También entenderían que si algún profeta local les dijera que sabe exactamente dónde se producirá la próxima avalancha, debería ser considerado un peligroso charlatán. De hecho, la criticalidad autoorganizada es la forma de entender algo que se sabía desde hace tiempo: algunos fenómenos parecen ser aleatorios, pero en realidad no lo son, al menos no del todo.

No se trata solo de una cuestión abstracta: tiene una gran relevancia para el mundo real. Por ejemplo, desde hace tiempo se sabe que los terremotos grandes son menos frecuentes que los pequeños, pero no fue hasta 1954 cuando Charles Francis Richter y Beno Gutenberg observaron que existe una

relación matemática, una "ley potencial inversa" (Gutenberg y Richter, 1954), que relaciona el número de terremotos con su tamaño. Esto significa que los terremotos son fenómenos emergentes que siguen leyes similares a las de la pila de arena descrita por el modelo BTW. La mayoría de los terremotos son lo suficientemente pequeños como para ser inofensivos: si vives en Japón, es probable que experimentes al menos unos cuantos terremotos al año que sean lo suficientemente grandes como para ser perceptibles, con los muebles a tu alrededor moviéndose y temblando, y todo el edificio generando ruidos inquietantes. Puede dar un poco de miedo pero, normalmente, no pasa nada. Al cabo de un rato, los temblores cesan y la gente vuelve a sus quehaceres. Pero la ley de la "cola gruesa" implica que los grandes terremotos son posibles y, de hecho, ocurren.

Pero ¿por qué los terremotos siguen la ley de Pareto? Aunque la ley puede expresarse con una ecuación muy sencilla, no hay forma de deducirla a partir de los primeros principios, es decir, a partir del conocimiento de, por ejemplo, la física de los terremotos o la estructura de las placas tectónicas de la Tierra. De nuevo, vemos que estas leyes son fenómenos emergentes de sistemas complejos. Parece que al universo solo le gustan las leyes potenciales y también que las redes son comunes en el universo.

Ver los sistemas complejos en forma de redes nos dice que los colapsos son siempre fenómenos colectivos, lo que significa que solo pueden ocurrir en redes de elementos conectados entre sí. Así, las cosas que colapsan, objetos cotidianos, torres, aviones, ecosistemas, empresas, imperios o cualquier otra cosa, son siempre redes. A veces, los nodos son átomos y los enlaces son enlaces químicos, es el caso de los materiales sólidos. Otras veces, los nodos son enlaces físicos entre elementos de estructuras artificiales, ese es uno de los temas de estudio de la ingeniería. Y en ocasiones, los nodos son seres humanos o grupos sociales y los enlaces se encuentran en la web o en la comunicación de persona a persona, o quizá se encuentran en intercambios monetarios. Este es el campo de estudio de las ciencias sociales, la economía y la historia.

Llegados a este punto, podemos considerar cómo podemos describir el colapso en términos de ciencia de redes. Anteriormente vimos que el colapso puede verse como una manifestación del principio PME (producción máxima de entropía), que muestra cómo los sistemas complejos se reorganizan de tal manera que generan tanta entropía como sea posible a la mayor velocidad

posible. ¿Y las redes? Por supuesto, las leyes de la termodinámica siguen siendo válidas para ellas, al igual que para todos los sistemas del universo. Siempre podemos considerar una red como un sistema en el que la energía se desplaza de un nodo a otro y acaba por disiparse escapando del sistema. El colapso de una red puede adoptar la forma de una reordenación de los enlaces entre nodos, o puede suponer que algunos nodos desaparezcan, o quizá que toda la red, en tiempos conectada, puede romperse en dos o más trozos más pequeños. Si esto ocurre en una red de celosía —es decir, en una pieza sólida de material—, llamamos a este fenómeno "fractura".

Hay varios tipos de reestructuraciones rápidas en las redes que pueden definirse como "transiciones de fase". En el mundo físico, las transiciones de fase pueden tener lugar en los materiales sólidos cuando los enlaces entre los átomos se reorganizan para formar estructuras cristalinas nuevas y diferentes. Es el caso de la "transformación martensítica", que transforma el hierro relativamente blando en el material duro que llamamos acero. Los herreros de la Antigüedad que se dedicaban a fabricar buenas espadas probablemente no sabían que estaban cambiando la estructura de red del metal que martilleaban, pero eso es lo que hacían. Además, hay todo tipo de transiciones de fase que pueden tener lugar en las redes virtuales, como describe, por ejemplo, Barabasi (Gao, Barzel y Barabasi, 2016). Solo unas pocas de estas transiciones pueden verse como colapsos reales, pero puede merecer la pena que dediquemos algún tiempo a describir el mecanismo del tipo de colapso de la red que definimos como "fracturas".

La fractura de los sólidos es un fenómeno complejo que los ingenieros han acabado por entender solo en tiempos relativamente recientes, principalmente con el trabajo de Alan Arnold Griffith (1893-1963), quien, a su vez, construyó su teoría sobre la base de un trabajo anterior de Charles E. Inglis (1875-1952). La idea básica es que la fractura es el resultado de una tensión localizada que se desarrolla en aquellos lugares del sólido donde existen gri*etas*. *T*al y como dice su nombre, las grietas son fisuras que separan la red atómica del sólido en dos porciones no unidas entre sí. Normalmente, se supone que son pequeñas y su efecto es insignificante, pero las grietas existen en todos los sólidos, excepto en condiciones muy especiales.

Inglis fue el primero en estudiar las propiedades de las grietas, estudió lo que denominó "concentración de tensiones" en la punta de la grieta. Su

modelo matemático dice que la tensión es mayor cuanto más aguda es la grieta y que en la punta de esta se pueden alcanzar órdenes de magnitud mayores que la tensión media del sólido. Llegados a este punto, a Griffith le quedaba calcular qué longitud debe tener la grieta para que la tensión en la punta sea mayor que la resistencia mecánica del sólido. En ese momento, los enlaces químicos en la punta de la grieta se romperían y la fractura se propagaría por el mecanismo habitual de PME. Eso hace que el sólido disipe la energía elástica que había acumulado en sus enlaces químicos tan rápidamente que "explosivo" es el término que describe el colapso resultante.

Resulta que la fractura es un fenómeno típico generado por la retroalimentación: una vez que se rompe un enlace químico en la punta, entonces el borde de esta se mueve hacia el siguiente enlace. Este también se rompe y la punta sigue avanzando. Es como si los átomos de la red del sólido se dijeran unos a otros "no puedo aguantar más, ahora te toca a ti". De este modo, la grieta se propaga y acaba provocando la fractura. Cuanto más larga es la grieta, más energía se libera: el resultado final es el precipicio de Séneca del sólido. El punto crítico que inicia la avalancha se denomina "longitud de grieta crítica" o, en ocasiones, "longitud de grieta de Griffith". ¡Ahora ya sabes por qué un globo estalla cuando lo pinchas con un alfiler! El pequeño agujero que creas en su superficie es una grieta y si el globo se estresa lo suficiente como para que su diámetro sea mayor que la longitud crítica de la grieta, entonces, ¡bang!

La teoría de Griffith se desarrolló para redes reales de átomos, pero puede ayudarnos a entender el fenómeno general del colapso de las redes, reales o virtuales. Ilustra algunos de los elementos comunes a todos los sistemas complejos: los fenómenos no lineales, la producción máxima de entropía, la creación de redes y esa característica típica que hace que los sistemas complejos estén siempre dispuestos a sorprendernos: su cambio imprevisible y repentino de un estado a otro. Dentro de ciertos límites, estas características también pueden observarse en sistemas aparentemente no relacionados: sistemas sociales, económicos y biológicos, ya que todos ellos están sujetos a las leyes termodinámicas generales que rigen el universo. Por supuesto, los seres humanos de un sistema socioeconómico no son lo mismo que los átomos de un sólido cristalino, pero parece existir un cierto grado de unidad en el funcionamiento del universo, siempre regido por las férreas leyes de la termodinámica.

VIVIR Y MORIR EN UN UNIVERSO COMPLEJO: LA HISTORIA DE LA AMEBA AMELIA

Cuando enseño dinámica de sistemas a mis alumnos, suelo utilizar un ejemplo sencillo para explicar los elementos básicos de la ciencia de los sistemas complejos. Es el de Amelia la ameba, una especie de personaje de cómic. Las amebas son criaturas unicelulares y, desde nuestro punto de vista de organismos multicelulares, podemos tender a considerarlas como formas de vida muy simples y asexuadas. Eso puede no ser correcto: se sabe que algunas amebas tienen tres sexos (Bloomfield et *al.*, 2010) y que otras realizan actividades complejas, como la formación de enjambres e incluso la agricultura (Brock et *al.*, 2011). Hay una especie, la Nae*gleria fowleri, q*ue son unos bichos que normalmente se alimentan de bacterias y que pueden comerse nuestro cerebro si se inhala uno solo por la nariz. Pero aquí se supone que Amelia y sus hermanas son solo un ejemplo de un ecosistema relativamente simple que se comporta como muchas otras criaturas unicelulares en términos de reproducción, es decir, que se divide en dos copias. Solo por diversión, supongamos que Amelia es una hembra.

Amelia comienza su existencia, sola, en un pequeño recipiente de cristal (una placa de Petri). Es una criatura depredadora: las amebas se alimentan de organismos más pequeños, o pueden ser "detritívoras", es decir, que comen material muerto. Supongamos que el recipiente está lleno de una solución nutritiva. Amelia come, crece y cuando es lo suficientemente grande, se divide en dos copias de sí misma. Luego, estas dos hijas (o tal vez hermanas) de la primera Amelia, se dividen de nuevo, esta vez en un total de cuatro copias. Y así se repite una y otra vez. Por supuesto, las hijas de Amelia solo pueden seguir creciendo mientras haya comida disponible y eso es un problema: una placa de Petri finita solo puede contener una cantidad finita de comida. En algún momento, el destino de los pobres bichos puede no ser agradable: tendrán que morir de hambre o asfixiarse en sus propios excrementos, posiblemente, ambas cosas a la vez.

Amelia y sus hijas pueden considerarse una metáfora simplificada del comportamiento de todos los sistemas complejos: consumen recursos, crecen y pueden colapsar. Los mecanismos de crecimiento de una población biológica pueden describirse según modelos desarrollados a lo largo de la historia de los estudios en biología y en economía. He dado nombres reconocibles a estos

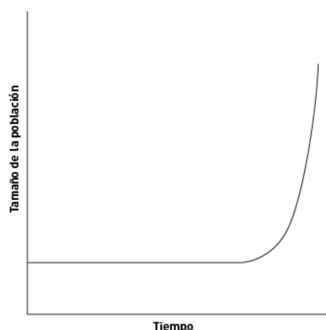
diferentes modelos, principalmente, tomados de las personas que los propusieron o, al menos, que estuvieron involucrados en ellos. Así que hablaremos de los "modelos de crecimiento" de los sistemas complejos.

1. El *modelo de Solow: l*as Amelias crecen exponencialmente para siempre.
2. El *modelo de Malthus: l*as Amelias crecen hasta que alcanzan una población estable y se quedan ahí.
3. El *modelo de Hubbert: l*as cifras de Amelias crecen y luego disminuyen.
4. El *modelo de Séneca: l*a población de Amelias crece lentamente y luego se desploma rápidamente.
5. El *modelo de Hokusai: e*l colapso de la población de Amelias está causado por una perturbación externa.
6. El *modelo de Lotka-Volterra (ta*mbién, el efecto Séneca): el sistema se recupera del colapso y vuelve a crecer en una serie de ciclos.

CRECER PARA SIEMPRE: EL MODELO DE SOLOW

Supongamos que hay abundante comida en la placa de Petri donde vive Amelia. La pequeña criatura crecerá felizmente y luego se dividirá en dos copias de sí misma. Empezamos con una ameba, luego habrá 2, después 4, 8, 16, 32 y así sucesivamente en lo que llamamos una "progresión geométrica", con el número de amebas duplicándose a intervalos de tiempo constantes. Este tipo de crecimiento en pasos discretos no es exactamente igual que el tipo continuo, llamado "exponencial", pero para nuestro propósito podemos suponer que lo es. Se puede representar en un gráfico como una curva ascendente que se dirige hacia el infinito. Obviamente, este tipo de crecimiento no implica ningún colapso (figura 4).

FIG**URA 4**
LA FORMA DEL CRECIMIENTO EXPONENCIAL



Este mecanismo de crecimiento exponencial de la población ya se conocía en el siglo XVIII y fue uno de los factores que llevaron a Malthus a expresar sus teorías sobre los límites del crecimiento de la población humana. En los sistemas económicos, el crecimiento exponencial también se ha conocido como el resultado de los tipos de interés constantes. Se supone que eso es bueno para los inversores, al igual que para toda una economía. En los años cincuenta, el economista estadounidense Robert Solow fue uno de los primeros en estudiar el crecimiento exponencial de las economías (Solow, 1956) utilizando un modelo que hoy se denomina "modelo de Solow-Swan". Este ha sido muy influyente en el pensamiento económico y sigue siendo popular hoy en día. Por tanto, podemos asociar este modelo al nombre de Solow.

Hay muchos ejemplos de crecimiento exponencial: como fenómeno biológico, es típico de criaturas como las bacterias y otros organismos unicelulares. Estas pequeñas criaturas pueden crecer muy rápido y, solo por diversión, podríamos calcular a qué velocidad podrían crecer las hijas de Amelia en presencia de abundante alimento. De forma aproximada, podemos decir que el tiempo de generación de las amebas es de 30 minutos, similar al de otras criaturas unicelulares (Todar, 2018). Una sola ameba puede pesar unos 10-10 g (es decir, una décima de milmillonésima de gramo, o bien 0,1 picogramos). Así pues, si empezamos con una sola ameba y dejamos que se divida sin ser molestada, la masa de la colonia podría convertirse en un gramo en unas 33 generaciones, es decir, en unas 15 horas. En 7 ciclos más, unas dos horas más, la colonia de amebas alcanzaría la masa de un experimentador humano (unos 100 kg).

Evidentemente, una masa así no podría caber en una placa de Petri, y el resultado sería algo parecido a la película de ciencia-ficción de 1958 The *Blob*,

en la que una criatura inicialmente pequeña y sin forma crece como la ameba comiendo gente en grandes cantidades. Por supuesto, eso nunca podría suceder en el mundo real, pero algo similar podría ocurrir si una sola ameba de la especie Nae*gleria fowleri se* encontrara dentro de un delicioso cerebro humano. Sus descendientes se comerían por completo el cerebro en pocos días. Afortunadamente, se trata de una enfermedad rara.

Este sencillo cálculo ilustra el poder del crecimiento exponencial. Las criaturas biológicas tienden a crecer tan rápido como pueden y solo se ven frenadas por las limitaciones en la disponibilidad de alimentos y otros recursos. Las criaturas unicelulares y pluricelulares se comportan de la misma manera, pero las grandes criaturas, los vertebrados, por ejemplo, crecen a un ritmo menor y rara vez de forma exponencial. Los ecosistemas no se parecen en nada al entorno prístino de una placa de Petri y, en condiciones normales, el crecimiento de las especies biológicas se ve restringido por la limitación de los alimentos, la depredación y otros factores. No obstante, hay algunos ejemplos históricos de crecimiento explosivo de vertebrados. Uno de ellos es el de los conejos en Australia, una plaga que se cree que comenzó en 1859 cuando un granjero australiano llamado Thomas Austin importó 24 conejos ingleses salvajes y los dejó en libertad en sus tierras. Al parecer, lo hizo solo por el placer de cazarlos y, probablemente, no podía ni imaginar el desastre que estaba causando. En pocos años, los 24 conejos se expandían a un ritmo de unas 70 millas por año, causando estragos en la fauna local. En la década de 1930, algunas estimaciones hablaban de 10.000 millones de conejos asilvestrados viviendo en Australia. Probablemente, sea una cifra exagerada, pero es cierto que a estas alturas los conejos están arraigados en algunas regiones de Australia y resisten los diversos intentos del Gobierno de erradicarlos mediante la caza, el envenenamiento o la propagación de enfermedades. Hasta ahora, no se ha dado ningún precipicio Séneca para los conejos australianos.

Otra especie que se ha extendido exponencialmente en Australia y ha causado un inmenso daño a la fauna local es el gato doméstico. Los gatos se introdujeron en el siglo XIX y ahora pueden existir más de 6 millones de gatos salvajes en toda Australia. Tantos que se han convertido en alimento para algunas comunidades aborígenes australianas. Luego, por supuesto, hay otra especie invasora en Australia, el Hom*o sapiens, q*ue ahora cuenta con unos 25

millones de individuos, también responsable de la destrucción de gran parte del medioambiente original australiano. Como todos sabemos, los seres humanos han crecido exponencialmente en toda la Tierra, alcanzando una población de más de 7.000 millones de individuos en la actualidad. Afortunadamente, está disminuyendo, pero no es obvio que la ralentización salve a esta especie de un próximo precipicio de Séneca causado por la superpoblación.

También existen ejemplos de crecimiento exponencial fuera de la biología. Uno de ellos, procedente de la física, es la reacción en cadena que da lugar a las explosiones nucleares, un ejemplo muy adecuado para un libro que trata de los colapsos. Estas reacciones nucleares se producen porque los núcleos atómicos de algunos elementos, en particular el uranio y el plutonio, pueden existir en forma "fisible". Cuando son alcanzados por un neutrón de baja energía, el núcleo se rompe en dos núcleos más pequeños, liberando energía y más neutrones, normalmente, al menos, dos. Estos neutrones pueden chocar con otros dos núcleos que, a su vez, liberan más neutrones y la reacción en cadena continúa con la suficiente rapidez como para generar una gran explosión a partir de unas pocas docenas de kilos de uranio. Otra buena ilustración del poder de la retroalimentación en los sistemas complejos. Entonces, por supuesto, la reacción en cadena debe detenerse cuando se agotan los núcleos de uranio, pero tal vez te interese saber que, en el momento en que se probó la primera arma atómica en Alamogordo, en 1945, se informó de que el físico nuclear Edward Teller temía que la explosión pudiera "encender la atmósfera" provocando la fusión autosostenida de núcleos de nitrógeno. Eso habría destruido toda la biosfera como efecto secundario. Afortunadamente, eso no ocurrió, ¡pero hay que tener en cuenta que se decidió realizar la prueba de todos modos!

El crecimiento exponencial nunca es tan deseado como en los sistemas financieros. Los tipos de interés positivos son una característica básica de las cuentas bancarias y todo el mundo se alegra de ver crecer exponencialmente su saldo. Lo mismo ocurre con la deuda, aunque, en ese caso, el crecimiento exponencial no se supone que sea algo bueno. El crecimiento es a menudo el único parámetro que se tiene en cuenta cuando leemos sobre el estado de la economía nacional. Una economía en crecimiento, se dice, aumenta los ingresos de todos y hace que la sociedad progrese hacia un bienestar material cada vez mayor. Estamos tan obsesionados con el crecimiento de la economía

que tendemos a llamar "crecimiento negativo" a lo que deberíamos llamar más razonablemente "declive", si no, "colapso".

Los orígenes de este énfasis en el crecimiento son diversos, pero en su mayoría son un desarrollo moderno. En los inicios de la economía como ciencia, durante los siglos XVIII y XIX, figuras tan importantes como Adam Smith (1723-1790), David Ricardo (1772-1823), John Stuart Mill (1806- 1873), y muchos otros, tenían una actitud muy pesimista en relación con el futuro de la economía. Tanto es así que a veces se llamaba a la economía "la ciencia lúgubre". Las cosas cambiaron con el tiempo y con la década de 1950 se impuso un estado de ánimo optimista con discursos sobre energía "demasiado barata para medirla", coches voladores y viajes de fin de semana a la luna para toda la familia. Y todo eso, por supuesto, solo habría sido posible dejando crecer la economía.

Es cierto que la economía mundial ha crecido a un ritmo medio del orden del 2% durante el último siglo aproximadamente, mientras que la población humana también ha crecido, aunque a un ritmo algo menor. Pero, evidentemente, el crecimiento no puede ser eterno. Hay varios factores limitantes, uno es que la agricultura necesita espacio para producir alimentos. El espacio para la agricultura es limitado e incluso tiende a reducirse, teniendo en cuenta la erosión de la tierra fértil y la deplorable costumbre humana de pavimentar la tierra con hormigón. Algunas personas parecen estar entusiasmadas por el hecho de que durante las últimas décadas la producción agrícola mundial de alimentos haya crecido más rápido que la población humana, pero eso no significa que sea una tendencia que pueda continuar para siempre. Solo algunas ideas tecnológicas realmente exóticas podrían superar este problema, por ejemplo, encontrar una forma de miniaturizar a los seres humanos como en la película de ciencia ficción El *increíble hombre menguante (19*57). O tal vez podríamos "virtualizar" a los seres humanos cubriendo completamente el planeta con paneles fotovoltaicos (Bardi, 2019), de modo que solo necesitaran comida virtual. Ni que decir tiene que no son soluciones especialmente prácticas.

Otros factores que limitarían el crecimiento humano en un planeta finito son los recursos minerales limitados, en particular de los combustibles fósiles (Berman, 2016) —y ni siquiera el petróleo de esquisto es infinito, a pesar de las afirmaciones en contra (como dijo el embajador de Estados Unidos en la

Unión Europea, Gordon Sondland, en 2019)—. Entonces, ¿qué pasa cuando empezamos a quedarnos sin los recursos que hacen crecer la economía? ¿O cuando las amebas se queden sin comida en su placa de Petri? Evidentemente, la respuesta no puede venir de una teoría sobredimensionada que describe el crecimiento como una simple función exponencial. Hay que profundizar en los mecanismos de crecimiento de los sistemas complejos.

LLEGAR A LOS LÍMITES DE LA PLACA DE PETRI: EL MODELO DE MALTHUS

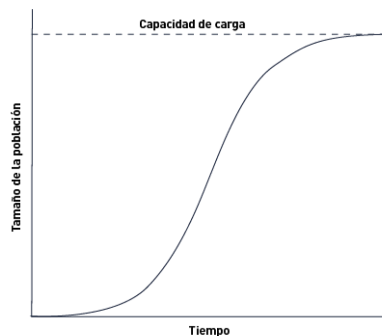
Tarde o temprano, los descendientes de la ameba Amelia tendrán que aceptar la cantidad limitada de alimento disponible en su placa de Petri y dejarán de crecer exponencialmente. Se trata de un fenómeno general y el primero en la historia en considerarlo fue Thomas Malthus (1766-1834) en su libro An *essay on the principle of population (17*98). Según Malthus, la limitada disponibilidad de tierra fértil acabará por detener el crecimiento de la población humana a causa de las hambrunas, las guerras, las enfermedades o las tres cosas juntas.

Malthus no era matemático y no podía hacer lo que hoy llamamos "ajuste de curvas", todo lo que nos muestra en su libro son tablas con datos sobre la población y la producción de alimentos en Inglaterra. En él se analiza ampliamente como la primera (la población) crece exponencialmente, mientras que la segunda (la producción de alimentos) solo puede crecer linealmente, en el mejor de los casos. El matemático francés Pierre François Verhulst (1804-1849) dio una versión matemática de las ideas de Malthus y creó una ecuación que representa la intuición de Malthus en términos matemáticos. Llamamos a esta ecuación "logística", "sigmoide" o, simplemente, "en forma de s". La curva crece rápidamente al principio, de forma casi exponencial. A continuación, se reduce a medida que se acerca a la "capacidad de carga" del sistema, el límite superior del crecimiento. Este comportamiento puede denominarse "modelo de Malthus" de crecimiento (figura 5).

Seguramente sabrás que hoy en día se suele acusar a Malthus de haber hecho "predicciones erróneas", hasta el punto de que el término "malthusiano" o "neomalthusiano" suele utilizarse a modo de insulto. A veces

se acusa incluso a Malthus de haber pedido el exterminio de los pobres. Por ejemplo, se le ha acusado de haber inspirado al Gobierno británico para exterminar a sus súbditos irlandeses creando artificialmente la gran hambruna de 1845-1849, o al menos no haciendo nada para mitigar sus consecuencias (Zubrin, 2013). Todo eso está muy lejos de ser la verdad: las "predicciones erróneas" de Malthus constituyen un ejemplo más de las muchas leyendas que infestan la Red. Miremos la curva de Verhulst: ¿ves algún colapso en ella? Por supuesto que no. Malthus no tenía ni idea de cómo podría ser un "colapso de Séneca" y nunca propuso fechas específicas para futuras hambrunas. El padre de los catastrofistas modernos nunca lo fue.

FIG**URA 5**
LA CURVA DE VERHULST, O 'LOGÍSTICA', QUE DESCRIBE EL MODELO DE CRECIMIENTO DE MALTHUS



En realidad, Malthus era aún más optimista que Verhulst y en su libro suponía que sería posible seguir aumentando durante muchas décadas la producción de alimentos de "la isla", entendida como Inglaterra. Así, según su predicción, no solo no habría colapso, sino que la población seguiría creciendo, solo que no de forma exponencial. Y no solo eso: nunca se le ocurrió decir que había que exterminar a los pobres. La cita que a menudo se le atribuye de que los irlandeses deberían ser "barridos de la tierra" es un caso clásico de cómo se puede tergiversar el significado de un texto extrayendo una frase de su contexto. Se puede leer esta acusación en el libro de Joel Mokyr de 1983, Why *Ireland Starved. Pe*ro si se examina la frase completa, se ve que Malthus solo proponía industrializar Irlanda: "barrer a los irlandeses de la tierra" significaba que se trasladarían a las ciudades para convertirse en trabajadores de las fábricas. En general, Malthus era, sin duda, un hombre de sólidos principios morales que hizo lo que pudo para advertir a sus semejantes

sobre un futuro que no le gustaba, pero que consideraba inevitable si la población seguía creciendo al ritmo típico de su época. Dadas las tecnologías disponibles cuando escribía esto, la única solución que podía proponer para evitar ese futuro era la abstinencia sexual. No es de extrañar que no fuera escuchado.

Las ideas de Malthus supusieron un notable avance en la comprensión de los límites al crecimiento de las poblaciones en un sistema cerrado, pero su modelo, tal como lo interpreta Verhulst, es demasiado simplificado para aplicarlo a los ecosistemas reales o a las poblaciones humanas. La función sigmoidea o logística resultó ser mucho más útil en otros campos. En el comercio, es típico que las ventas de un nuevo producto sigan la curva de penetración en el mercado. Al principio, las ventas son lentas, pero crecen rápidamente a medida que el nuevo producto es conocido por los clientes potenciales. A continuación, estas empiezan a descender a medida que el mercado se satura. Saber que las ventas seguirán la derivada de la curva logística proporciona información útil a los productores, indicándoles el mejor momento para comercializar una versión nueva y mejorada con más parafernalia. Hay curvas logísticas en casi todos los sistemas sociales y económicos, y el científico italiano Cesare Marchetti dedicó la mayor parte de su carrera a estudiarlas. Según él:

> Durante los últimos 30 años, he analizado miles de series temporales relativas a todo tipo de fenómenos sociales y económicos: desde la destrucción de las trilladoras (1 mes) hasta la evolución del poderío naval británico (500 años), desde los cartuchos de artillería disparados en Europa por las fuerzas estadounidenses durante la Primera Guerra Mundial hasta las bajas americanas en la guerra de Vietnam, desde las víctimas de las Brigadas Rojas en Italia hasta las de la caza de brujas en la Edad Media, etc. El resultado desconcertante es que un modelo logístico muy simple siempre puede ajustar los datos en un formato predictivo (Marchetti, 2008).

Aparte del hecho de que la caza de brujas no fue una característica de la Edad Media, sino del posterior y supuestamente "iluminado" Renacimiento, Marchetti identifica correctamente la validez general de la curva logística en muchos proyectos humanos. Simplemente, no funciona para los ecosistemas por una buena razón: el hecho de que los seres vivos tienden a morir si carecen de comida. Pensemos en cómo se produce la curva logística en química: si alguna vez has realizado una val*oración en* una clase de laboratorio, has pasado el tiempo procediendo lentamente para determinar la concentración de algún

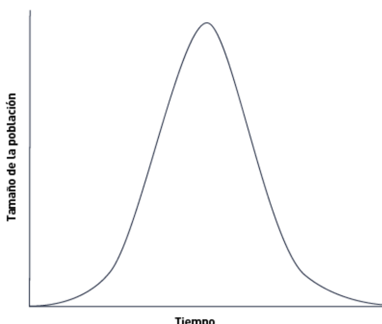
elemento en una solución construyendo gradualmente una curva logística mientras añadías reactivos a la solución, gota a gota. Funciona de maravilla en química porque las moléculas no "mueren": una vez que han reaccionado, se quedan ahí. Pero ese no es el caso de las amebas en una placa de Petri: mueren cuando se les acaba el alimento. Por tanto, el límite de la curva logística es que nunca genera colapso. Necesitamos algo más sofisticado que no solo nos diga cómo crece un sistema, sino también cómo decae.

TODO LO QUE SUBE DEBE BAJAR: EL MODELO DE HUBBERT

Los seres vivos necesitan comida y la comida no puede ser infinita en un recipiente finito. Cuando las hijas de Amelia empiecen a quedarse sin comida en su limitada placa de Petri, no seguirán la suave y decreciente pendiente que propone el modelo de Malthus/Verhulst, más bien empezarán a morir de hambre. En ese momento, rezar a su Dios Ameba no las ayudará mucho a escapar de su triste destino. Lo mismo ocurre con un sistema industrial que explota un recurso no renovable, por ejemplo, el petróleo. Tarde o temprano, no quedará nada que extraer, al menos en condiciones de generar un beneficio económico. Cuando se llegue a ese punto, la industria implicada en la extracción deberá desaparecer.

La idea de que "todo lo que sube debe bajar" tiene que ser muy antigua. Una de sus formas es la canción de 1968 "Spinning Wheel" de*l* grupo Blood, Sweat & Tears. Pero no podemos hacer un modelo cuantitativo a partir de una canción. Necesitamos algo cuantitativo y el primer modelo de este tipo fue propuesto por el geólogo estadounidense Marion King Hubbert en 1956. Se trataba de un modelo desarrollado no para describir un sistema biológico, sino económico: la extracción de petróleo. La curva en forma de campana que propuso Hubbert se denomina a veces "curva de Hubbert". Más tarde, la idea se dio a conocer con el término "pico del petróleo", sugerido por Colin Campbell en 2001 (Bardi, 2019). Podemos dar a este ciclo de crecimiento y colapso el nombre de "modelo de Hubbert" (figura 6).

FIG**URA 6**
LA CURVA EN FORMA DE CAMPANA, TAMBIÉN LLAMADA CURVA DE HUBBERT



En su artículo de 1956, Hubbert presentó dos proyecciones sobre la producción de petróleo de Estados Unidos. Ambas mostraban un pico que se esperaba que tuviera lugar alrededor de entre 1965 y 1970. Resultó ser un buen pronóstico, al menos para una de las dos curvas. La producción de petróleo de los 48 estados contiguos de Estados Unidos alcanzó su pico en 1970, para descender después. La curva siguió el modelo de Hubbert hasta la primera década del año 2000, cuando las inversiones en la extracción de petróleo de los yacimientos de esquisto generaron un nuevo ciclo de crecimiento. En general, el modelo puede aplicarse a una variedad de sistemas relacionados con los recursos minerales, no solo al petróleo.

El modelo de Hubbert también puede describir cuantitativamente algunos sistemas económicos que implican recursos renovables que no pueden renovarse con la rapidez suficiente para que su explotación continúe. Un buen ejemplo es el caso de la industria ballenera del siglo XIX. Probablemente, todos tengamos un modelo mental de aquellos tiempos a partir de la novela Mob*y Dick, d*e Herman Melville. Sin embargo, en la novela, Melville nunca nos dice para qué se utilizaba el aceite de ballena: se usaba como combustible para las lámparas de aceite. En cierto sentido, fue un precursor del petróleo moderno. Durante el siglo XIX, el aceite de ballena resultó ser más barato que los aceites vegetales, era limpio y no generaba malos olores al quemarse. La industria producía también "hueso de ballena", un precursor del plástico moderno. Se utilizaba para aplicaciones como refuerzos de corsés para señoras y rascadores de espalda. En consecuencia, la caza de ballenas atravesó un ciclo de crecimiento fenomenal que la transformó en una importante industria mundial.

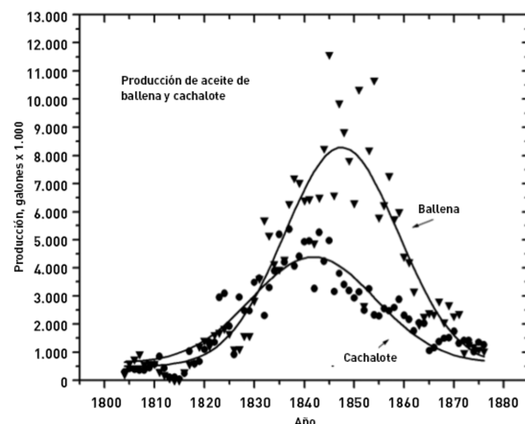
Alrededor de 1850, la industria ballenera americana estaba en su punto álgido, con una producción total que llegaba a cerca de los 15 millones de

galones de aceite al año (Starbuck, 1878). Pero pronto comenzó el declive y la curva de producción tanto del aceite de ballena como del hueso siguió una curva de Hubbert en forma de campana (Bardi, 2004) (figura 7).

Una interpretación común para el declive de la caza de ballenas es que fue causado por la introducción del queroseno como combustible para lámparas, algo que destruyó el mercado del aceite de ballena. Pero eso significa estirar las fechas más que un poco. Cuando se perforó el primer pozo de petróleo en Pensilvania, en 1859, la producción estadounidense de aceite de ballena llevaba años en declive y ya era la mitad de lo que había sido en su momento álgido. El queroseno tardó varios años más en superar al aceite de ballena en términos de producción. En realidad, se podría invertir razonablemente la cadena de causas y efectos: ¡el queroseno se comercializó porque la producción de aceite de ballena estaba disminuyendo!

FIGURA 7

EL CICLO DE LA INDUSTRIA BALLENERA ESTADOUNIDENSE EN EL SIGLO XIX. AQUÍ, 'BALLENA' REPRESENTA LA ESPECIE 'BALLENA FRANCA'



Fuente: History of the American Whale Fishery (Starbuck, 1878).

Además, el queroseno se consideraba un combustible inferior, y siempre quedaba un mercado para el aceite de ballena como combustible para lámparas. Era más caro pero se consideraba de mejor calidad. Por no hablar del hecho de que los pozos de Pensilvania no podían producir buenos rascadores de espalda, al menos hasta que se aprendió a fabricar plásticos a partir de hidrocarburos, pero eso llevó casi un siglo.

En general, la razón del declive de la industria ballenera es clara: las ballenas se mataban a un ritmo mucho más rápido del que podían

reproducirse. Según algunos estudios, a finales del siglo XIX solo quedaban en los océanos del mundo unas 50 hembras de la especie más cazada por los balleneros, la "ballena franca" (Scott Baker y Clapham, 2004). Las ballenas resultaron ser un recurso casi no renovable. Todavía hoy, el número de ballenas francas sigue siendo reducido y la especie está en peligro de extinción, aunque ya no sea cazada, al menos oficialmente (Meyer-Gutbrod y Greene, 2018).

Llegados a este punto, hay que explicar por qué el modelo de Hubbert funciona tan bien en tantos casos, tanto para los recursos renovables como para los no renovables (aunque no en todos los casos, por supuesto). Un problema, aquí, es que Hubbert no era un teórico en el sentido de ser una persona que construía modelos matemáticos. Era un empirista que observaba los datos y utilizaba el sentido común para interpretarlos. De su artículo de 1956 se desprende que, en primer lugar, examinó los datos históricos de producción de petróleo de Ohio e Illinois y observó que, en ambos casos, la curva de producción tenía aproximadamente forma de campana. A continuación, supuso que la producción de todos los estados de Estados Unidos seguiría una curva similar. Tendría que someterse a las restricciones de una cantidad total limitada de petróleo extraíble y al hecho de que la tasa de extracción debe ser cero al principio y al final del ciclo de producción. Dada la aproximación que supone este planteamiento, no necesitó entrar en los detalles de qué tipo de función matemática proporcionaría la "mejor" curva en forma de campana. De hecho, las curvas de las figuras de sus primeros trabajos parecen dibujadas a mano.

Más tarde, la curva de Hubbert se identificó con una de las varias curvas de forma de campana existentes en el arsenal de la estadística. La preferida solía ser la derivada de la función logística, como se puede encontrar descrita en un artículo del experto francés en petróleo Jean Laherrère (2000). Existen otras curvas en forma de campana con nombres como Gompertz, Ogee, Bass y otros. De ellas, solo la función de Bass se ha utilizado como herramienta para interpretar el agotamiento de los recursos (Guseo, 2011). Y por supuesto, la curva en forma de campana paradigmática es la curva "gaussiana" o "normal", que también puede ajustarse a las curvas de producción histórica (Bardi, 2005).

Pero ¿por qué la producción debe seguir una curva en forma de campana? Por ejemplo, en el caso de la gaussiana, la forma de campana se genera por un

gran número de eventos independientes que ocurren al azar, como ocurre cuando se tiran los dados. Pero difícilmente se podría definir el ciclo extractivo de la industria petrolera en términos de lanzamiento de dados. Una interpretación persistente de la curva de Hubbert se deriva de una afirmación de Campbell y Laherrère en 1998, quienes señalaron que “la suma de la producción de yacimientos de distintos tamaños y edades suele arrojar una curva de producción en forma de campana para el conjunto de la región”. Pero esto es simplemente una observación, no un modelo.

Por tanto, necesitamos una teoría mejor y podemos crearla utilizando la herramienta llamada “dinámica de sistemas”. Sin entrar en los detalles de su funcionamiento, digamos que la dinámica de sistemas se basa en la idea de que la energía (o alguna otra magnitud) fluye de un sto*ck a* otro. El formalismo de la teoría proporciona herramientas para describir un sistema en términos de los diversos sto*cks y* flujos que lo componen. En el caso más sencillo, el sto*ck po*dría ser una bañera parcialmente llena de agua: puede obtener agua del grifo y perderla por el sumidero. A algunos expertos en dinámica de sistemas parece gustarles la analogía de la bañera y suelen utilizarla ampliamente como herramienta de enseñanza (Sweeney y Sterman, 2000).

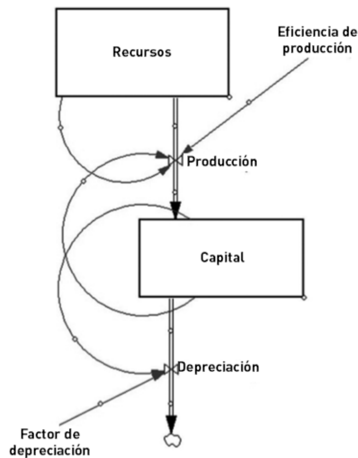
Un pozo de petróleo o un yacimiento entero pueden considerarse como una reserva de petróleo. Hay algunas diferencias con respecto a una bañera: una es que no hay un “grifo” para reponer las existencias de petróleo, el petróleo es un recurso no renovable. Otra diferencia es que el sumidero no cuenta con un simple tapón que se pueda quitar a voluntad. Para ser extraído o “producido”, como se suele decir en la jerga de la industria petrolera, se necesitan equipos, personas, maquinaria, transporte, financiación, etc. Esta necesidad puede representarse en términos de un segundo sto*ck de*l modelo que podemos denominar “capital”: es el conjunto de los recursos materiales, humanos y financieros necesarios para extraer el petróleo. Este segundo sto*ck pu*ede verse como creado por el primero, aunque de forma indirecta. Con los beneficios de la extracción, la industria petrolera puede invertir en más capital que puede utilizarse para extraer más petróleo. Las dos reservas se encuentran en una relación clásica de retroalimentación mutua. Cuanto más capital se tiene, más rápido se extrae el petróleo, cuanto más petróleo hay, más rápido se puede extraer. Luego, por supuesto, hay una inevitable retroalimentación de amortiguación que se genera con el agotamiento del petróleo. A medida que se

vacía gradualmente el sto*ck de* petróleo, los beneficios también bajan y eso afecta negativamente al capital extractivo que tiende a disminuir por la depreciación. A la larga, estos factores detienen el crecimiento de la producción y hacen que empiece el declive. A largo plazo, por mucho capital que se consiga generar, no se puede extraer un petróleo que no hay, y la producción debe detenerse. El modelo genera una curva en forma de campana muy bonita que se corresponde con la de Hubbert.

En la figura 8 se puede ver una representación sencilla de la dinámica del sistema del modelo de Hubbert. Aquí, solo tenemos que observar cómo los sto*cks se* representan mediante recuadros y los flujos mediante flechas gruesas o de doble línea. Las retroalimentaciones del sistema se representan mediante flechas finas o de una sola línea que actúan sobre las "válvulas" del sistema. El dibujo no indica cómo se realiza exactamente la acción, que debe ser especificado por el modelador que está tras ello. El programa ofrece herramientas para introducir ecuaciones que le indican que, por ejemplo, el flujo de salida de un sto*ck es* proporcional al tamaño de este. Pero puede ser proporcional a otras variables, o estar sujeto a umbrales, o cosas por el estilo. En cualquier caso, el concepto es claro: el sistema evoluciona y disipa energía en función de la cantidad de recursos disponibles. Para más detalles sobre cómo se pueden utilizar estos modelos para describir el colapso, podéis consultar mi primer libro sobre el efecto Séneca (Bardi, 2017) (este modelo, por cierto, es una versión simplificada del modelo de Lotka-Volterra, bien conocido en biología).

FIG**URA 8**

UNA REPRESENTACIÓN SENCILLA DEL MODELO DE HUBBERT SEGÚN LAS CONVENCIONES DE LA DINÁMICA DE SISTEMAS. LOS RECTÁNGULOS REPRESENTAN LOS STOCKS, LAS FLECHAS DOBLES REPRESENTAN LOS FLUJOS. LAS FLECHAS DELGADAS REPRESENTAN LAS RETROALIMENTACIONES



Obsérvese también que el modelo contiene dos parámetros principales (o *stocks*), uno para la cantidad del recurso y otro para la cantidad de capital disponible. El segundo parámetro no aparece en la versión estándar del modelo de Hubbert. Sin embargo, seguramente el petróleo no se extrae solo, por lo que la versión de dinámica de sistemas del modelo nos dice algo importante sobre cómo funciona el agotamiento: no se "agota" un recurso natural sin más; se pueden agotar (y lo hacen) los recursos de capital necesarios para explotar el recurso como resultado del aumento de los costes de producción y la reducción de los beneficios. Con el tiempo, esto desalienta las nuevas inversiones y los recursos de capital se pierden en el fenómeno llamado "depreciación". A menudo se dice que Ahmed Zaki Yamani, exministro de Petróleo de Arabia Saudí, dijo que "la Edad de Piedra no terminó porque la gente se quedara sin piedras, así que la edad del petróleo no terminará porque la gente se quede sin petróleo". De hecho, la era del petróleo terminará porque la gente se quedará sin el capital necesario para extraerlo: ¿quién invertiría en algo que no da beneficios?

Este modelo de la curva de Hubbert sigue siendo muy simplificado, pero es lo suficientemente realista como para poder ofrecer una descripción cuantitativa de varios sistemas del mundo real, como por ejemplo la pesca (Perissi et *al.*, 2016). Pero muchos sistemas muestran un colapso más rápido que el crecimiento, es decir, el modelo de Hubbert no suele generar la "curva de Séneca", por lo que necesitamos modelos más sofisticados.

EL CAMINO HACIA LA RUINA ES RÁPIDO: EL MODELO DE SÉNECA

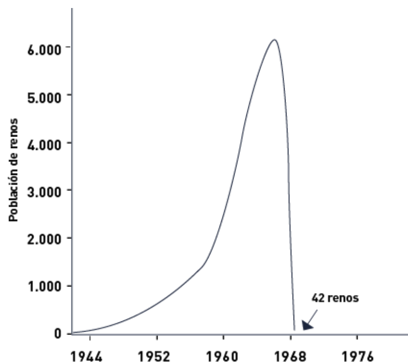
Cuando las hijas de la ameba Amelia empiezan a quedarse sin comida en su placa de Petri, su destino es inevitable: deben morir de hambre. Ni siquiera el canibalismo (las amebas no tienen fama de ser exigentes con lo que comen) cambiará su destino. También tendrán problemas con sus propios excrementos, es decir, empezarán a envenenarse con ellos. Independientemente de lo que ocurra con los pobres bichos, está claro que morir es mucho más rápido que el laborioso proceso de nacer, crecer y reproducirse. Por lo tanto, no esperamos que la curva de población de las amebas sea la curva simétrica en forma de campana de Hubbert. Será una curva asimétrica "en forma de diente de sierra" en la que la población disminuirá más rápido de lo que creció.

El filósofo romano Lucio Anneo Séneca fue posiblemente el primero en comprender que los sistemas complejos tienden a crecer lentamente y a colapsar rápidamente, por lo que podemos utilizar el término "modelo de Séneca" para este tipo de modelo. Séneca no era un matemático, a lo sumo tenía algunos conocimientos de geometría, pero no tenía ni idea de lo que era una ecuación, y ni siquiera conocía nuestros números árabes modernos. Y ni que decir tiene que no sabía dibujar un diagrama cartesiano. Sin embargo, tenía una buena comprensión cualitativa de lo que hoy llamamos "sistema complejo". Al fin y al cabo, nuestra mente también es un sistema complejo y la intuición no es una mala manera de entender el mundo de dichos sistemas. Es la materia que yo llamo "efecto Séneca".

Un ejemplo del mundo real de un colapso de Séneca es el de la población de renos de la isla de San Mateo, en el norte del océano Pacífico. En 1944, el ejército estadounidense llevó allí un pequeño grupo de renos, 29, con la idea de utilizarlos como "almacén de carne con patas" sin necesidad de refrigeradores. La idea parecía funcionar, los renos comían líquenes y hierba, y se reproducían en gran número. La retroalimentación potenciadora de las poblaciones había surtido efecto y, unos 20 años más tarde, en 1963, la población de renos había aumentado a unos 6.000 individuos. Demasiados para esa pequeña isla: se estaban quedando sin comida y no solo eso: estaban enfermos. Este es el efecto que yo llamo "crujido dinámico", se produce cuando más de un factor empieza a operar en un sistema complejo para derribarlo todo rápidamente. Sin apenas grasa en sus cuerpos, los renos no solo estaban hambrientos, sino que también eran vulnerables a las infecciones y a las garrapatas. Entonces, empezaron a morir. Un par de duros inviernos

terminaron el trabajo: en 1968 solo quedaba un pequeño grupo de hembras demacradas e infestadas de parásitos. Dos años después, no quedaba ningún reno vivo: solo sus huesos esparcidos por toda la isla (Campbell y Laherrère, 1998) (figura 9).

FIGURA 9
POBLACIÓN DE RENOS DE LA ISLA DE SAN MATEO



Fuente: Campbell y Laherrère (1998).

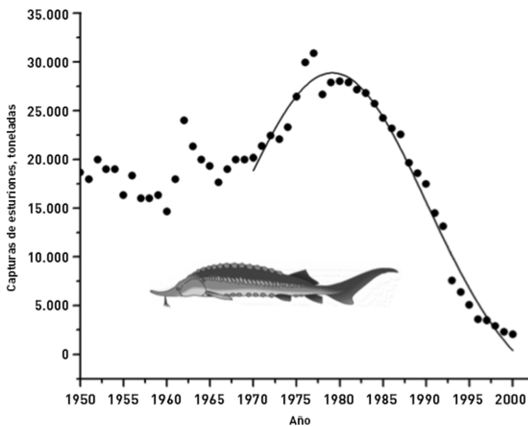
Veamos otro ejemplo de una población biológica aniquilada en un colapso similar al de Séneca. Se trata del colapso de la pesca del esturión en el mar Caspio. El colapso de la pesca es un efecto común de la sobreexplotación (Perissi et *al.*, 2017), como vimos anteriormente sobre la pesca del bacalao del Atlántico. Pero el caso del esturión es especial por el hecho de que muestra un declive especialmente abrupto. Como se sabe, el esturión es el origen del preciado caviar negro, hoy prácticamente desaparecido del mercado mundial. Ha sido sustituido, pero solo en parte, por el caviar obtenido a partir de esturiones de piscifactoría (datos de FAOSTAT) (figura 10).

Los datos disponibles sobre el ciclo de la pesca del esturión son solo parciales, pero es evidente que en el proceso intervinieron múltiples factores. En particular, la población de esturiones del Caspio se vio afectada por la contaminación generada por las industrias que utilizaban el mar como vertedero de sus residuos. Otro factor fue el alto valor del caviar, por el que la gente estaba dispuesta a pagar un precio totalmente desproporcionado con respecto a su valor nutricional. Este factor puede haber llevado a la industria a una sobreexplotación ilegal de los esturiones que no pudo ser gestionada por los organismos reguladores. La caída de la Unión Soviética, en curso cuando comenzó el colapso, hizo imposible gestionar la pesca del Caspio de forma

centralizada y perseguir las actividades ilegales. Tenemos, de nuevo, un efecto de crujido dinámico: dos o más factores que colaboran para hacer caer el sistema.

FIGURA 10

EL COLAPSO DE LA PESCA DEL ESTURIÓN EN EL MAR CASPIO

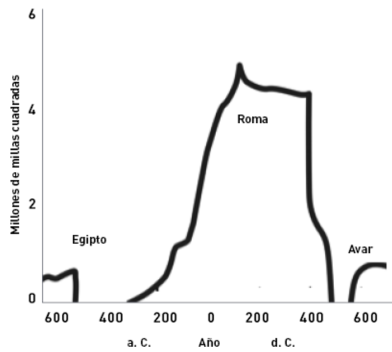


Fuente: FAOSTAT.

El efecto Séneca se produce en todo tipo de sistemas, no solo en las cadenas tróficas biológicas. Podemos tener cadenas industriales o financieras formando un sistema complejo donde el elemento de base de la cadena es el mercado de un determinado producto. La saturación del mercado toma el papel del agotamiento de los recursos naturales y un factor paralelo es el financiero: en algún momento los bancos pueden negarse a financiar una empresa que muestra signos de agotamiento. Eso acaba rápidamente con el sistema. Veremos ejemplos de colapsos financieros tipo Séneca en capítulos posteriores. Aquí, permitidme reportar el caso del Imperio romano de Occidente como ejemplo a gran escala. En esta imagen se ven algunos datos reportados por Taagepera (1979). Son datos parciales porque se refieren solo a la extensión del imperio, pero son representativos del fenómeno de crecimiento y colapso de un gran sistema social (figura 11).

FIGURA 11

EL COLAPSO DE LA POBLACIÓN DEL IMPERIO ROMANO



Fu**ente: Taagepera (1968), An Analysis of the Surface Area of the Western Roman Empire until CE 476.**

Existen más datos que demuestran que el colapso romano fue rápido y brutal. Por ejemplo, los datos arqueológicos muestran un abrupto declive de la contaminación derivada de la industria metalúrgica romana. Lo que vemos es un verdadero colapso de la industria romana y, con ella, de toda la sociedad romana (McConnell et *al.*, 2018).

Ahora bien, ¿tienen estos colapsos algo en común? Sí, lo tienen. Se trata de sistemas en los que más de un factor contribuyó al declive: es el efecto de "crisis dinámica". Hay un patrón característico: los factores negativos tienden a confluir para acelerar la caída, como si hubiera una mente maligna ocupada en planificar el desastre. Pero no es así, es simplemente que en los sistemas complejos todos los elementos tienden a estar conectados y cuando uno falla, se lleva consigo a otros elementos: es el típico mecanismo de avalancha. En un sistema complejo siempre hay algo más que una simple cadena de casos de causa y efecto. El colapso es un fenómeno complejo, típico de los sistemas complejos, y se produce por una combinación compleja de efectos.

¿Podríamos describir el fenómeno del colapso de Séneca mediante un modelo matemático? Hay varias funciones que pueden proporcionar una curva cíclica inclinada hacia delante, pero es difícil encontrar una que incorpore los factores que acabo de describir. Si el colapso está vinculado a múltiples factores, el mejor modelo es el que describe explícitamente estos factores. Por lo tanto, un buen enfoque es utilizar la dinámica de sistemas, como se hizo en la sección anterior. En el modelo de Hubbert, el modelo tiene en cuenta dos parámetros: los recursos y el capital —este último es la entidad (industria o población) que crece al explotar el recurso—. En este caso, solo hay una restricción: el agotamiento progresivo del sto*ck de* recursos que encarece la

producción. ¿Es posible modificar este modelo añadiendo más restricciones?

Sí, es posible. En un modelo que desarrollé en 2011, añadí una ecuación y un parámetro más al modelo, definiéndolo como "contaminación". No tiene que identificarse con un tipo específico de contaminación, es solo una entidad más que afecta negativamente al parámetro "población" o "capital". Pueden ser los bárbaros invasores, el terrorismo, el cambio climático, el malestar social, las epidemias, etc. La restricción adicional frena el crecimiento del sistema y, finalmente, acelera su colapso. Este es un comportamiento muy general de los sistemas complejos. Cuando son multiparamétricos, suele ocurrir que varios parámetros se "alían" para hacer caer el sistema. Y esto, típicamente, genera el precipicio de Séneca.

Por lo que sé, el modelo de tres parámetros es el único que genera el precipicio de Séneca, que es completamente autosuficiente, es decir, que solo contiene parámetros "endógamos". Pero no es el único modelo posible para el efecto Séneca. Suponiendo factores externos ("forzamientos"), es posible generar el precipicio con solo dos parámetros (un modelo de dos *stocks*). Donella Meadows muestra un modelo de este tipo en su libro *Thinking in Systems* (2008). En este caso, el modelo incluye una restricción externa en el sistema que mantiene el crecimiento por debajo de una tasa máxima fija. Como resultado, en algún momento el sistema deja de crecer y entra en caída libre, generando el precipicio. Otro modelo que genera el colapso ha sido propuesto por François Roddier y describe el precipicio de Séneca en relación con la superficie de Van der Waals, un fenómeno físico relacionado con la condensación de los gases (Roddier, 2019). También existen modelos cualitativos que explican el colapso sistémico: uno es la "ley de exclusión competitiva de Gause", bien conocida en biología. Dice que cuando dos especies compiten por los mismos recursos, una se extingue rápidamente. Hay varios ejemplos en biología, pero también en economía. Uno de ellos es cómo la difusión de la publicidad en Internet tuvo el efecto de privar a los periódicos de sus ingresos publicitarios, provocando su colapso en términos de ventas y beneficios (Bardi, 2015).

También se suele observar que intentar evitar o ralentizar el colapso puede llevar a un colapso más rápido después de algún tiempo. Per Bak recoge algunos ejemplos en este sentido en su libro *How Nature Works* (1996). En la parte titulada "Repetición de la cinta de la evolución", Bak describe cómo

intervinieron en la evolución de un sistema que simulaba la evolución de una especie en un ecosistema, tratando de eliminar una de las mayores fluctuaciones:

> A continuación, identificamos el suceso que inició una de las mayores avalanchas en ese sitio en particular. Por supuesto, eso solo se pudo hacer a p*osteriori [*…]. Eliminamos dicho suceso sustituyendo la adaptabilidad con un valor más alto y previniendo así la extinción en ese lugar. Esta interrupción podría corresponder a la modificación de la trayectoria de un meteorito, o a impedir que la rana desarrollara su lengua resbaladiza. A continuación, ejecutamos de nuevo la simulación. En el punto en el que se produjo la pequeña perturbación, la historia cambió […] la puntuación mayor desapareció. Sin embargo, eso no evitó en absoluto los desastres; otras perturbaciones se produjeron en puntos posteriores. Así pues, las grandes perturbaciones no pueden evitarse mediante la manipulación local en un intento de eliminar la fuente de la catástrofe. Si los dinosaurios no hubieran sido erradicados por un meteorito (si es que lo fueron), algún otro gran grupo de especies habría sido eliminado por algún otro evento desencadenante (Bak, 1996: 157).

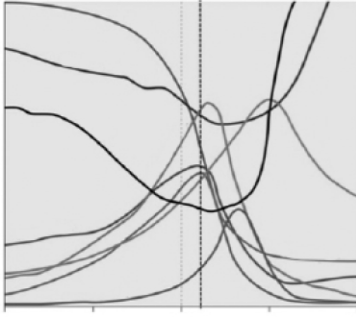
Como otro ejemplo, en su libro Str*uctures (19*78), James Gordon explica que el intento de reforzar un dispositivo mecánico puede acabar en su debilitamiento. Uno de los ejemplos que pone es el del avión de combate Fokker D8 Eindecker de la Primera Guerra Mundial. Tendía a perder sus alas bajo tensión y los intentos iniciales de reforzarlas en los lugares equivocados condujeron a problemas aún peores de debilidad estructural. Los constructores pudieron resolver el problema "debilitando" una de las vigas del ala para distribuir la carga de forma más equitativa. Seguramente, una idea contraria a la lógica, pero funcionó.

Sin duda, hay muchas otras formas de desarrollar modelos cualitativos y cuantitativos en los que múltiples efectos, externos o internos, se combinan para derribar el sistema y generar un rápido colapso. Uno de ellos es el modelo utilizado en el conocido estudio Los *límites del crecimiento (M*eadows et *al.,* 1972) (figura 12).

Si se observan con atención las curvas del escenario del caso base (que se muestra en la figura), así como las de otros escenarios presentados en el estudio, se verá que, en muchos casos, hay ciclos en los que el descenso es más rápido que el crecimiento. Ya habían descubierto el efecto Séneca, aunque no utilizaran ese nombre.

FIG**URA 12**

EL ESCENARIO 'CASO BASE' DE LA EDICIÓN DE 1972 DE LOS LÍMITES DEL CRECIMIENTO



Fuente: Cortesía de Dennis Meadows.

En general, ninguno de estos modelos demuestra que el efecto Séneca deba producirse necesariamente en todos los sistemas complejos, pero está claro que es un fenómeno común. Parece que no importa si somos amebas o seres humanos, vivimos en un mundo en el que los colapsos no son un error, sino una característica.

CUANDO LO INESPERADO NOS GOLPEA: EL MODELO DE HOKUSAI

Se supone que las hijas de la ameba Amelia viven y mueren en su placa de Petri, enfrentándose a todas las oportunidades y desafíos que encuentran allí. Pero no se puede excluir que les ocurra algo completamente distinto. Imaginemos, por ejemplo, que un aburrido estudiante de postgrado del laboratorio decida que el experimento no ha funcionado como debería y procede a lavar y desinfectar la placa de Petri. Eso sería una catástrofe súbita e imprevisible para las amebas, aniquiladas sin piedad en muy poco tiempo.

El pintor japonés Hokusai nunca pensó en términos de modelos matemáticos, pero proporcionó una gran impresión visual de lo que ocurre cuando las cosas se ponen realmente mal de repente con su famoso cuadro La *ola (ha*cia 1830). Lo más probable es que el cuadro represente un tsunami, palabra japonesa que significa 'ola del puerto'. Es el resultado de una subida repentina del nivel del mar que llega a la costa, normalmente tras un terremoto. Cuando se produce un tsunami, no solo el descenso es más rápido que el crecimiento, sino que es tan rápido y avisa con tan poca antelación que poco se puede hacer para evitarlo. Por ejemplo, cuando el terremoto de Tōh*oku*

golpeó Japón el 11 de marzo de 2011, lo mejor que pudo hacer el sistema de alerta fue anunciar la llegada de la gran ola con poco más de media hora de antelación. Esto pilló a muchas personas por sorpresa y muchas resultaron arrastradas, el número de víctimas ascendió a más de quince mil. Podríamos llamar a este tipo de colapsos repentinos e inesperados el "modelo de Hokusai".

La característica de los colapsos del modelo de Hokusai no es tanto su magnitud, aunque puedan ser grandes, como que, en términos estadísticos, están fuera del rango de los eventos contra los que normalmente se toman precauciones. Supongamos que vas caminando por la ciudad: sabes que conlleva un cierto peligro de ser atropellado por un coche y lo minimizas caminando por la acera y mirando cuidadosamente a izquierda y derecha antes de cruzar la calle. Sí, pero tus precauciones no sirven de nada si te golpea una teja que cae de un edificio. Se trata de un suceso raro, tan raro que no parece que existan datos estadísticos sobre su frecuencia en todo el mundo, pero ocurre: por ejemplo, en 2017 un turista español murió al caerle una piedra mientras visitaba una de las iglesias antiguas de Florencia, la Basílica de Santa Croce (Ansa, 2017). Fue realmente un colapso repentino para este hombre e impresiona pensar que había venido desde España para encontrarse exactamente en el lugar y en el momento en que cayó esa piedra. ¿Había alguna lógica en el universo que estableciera que la trayectoria de esta piedra en particular y esta persona en particular tenían que cruzarse? No podemos decirlo, salvo por el hecho de que si una piedra cae dentro de una iglesia, normalmente llena de turistas, es probable que golpee a uno de ellos.

Las probabilidades pueden cambiar en función de cómo enmarquemos su cálculo. Llámese "acto de Dios" o simplemente mala suerte, el hecho de ser alcanzado por una piedra que cae constituye uno de esos sucesos que pueden golpear a la gente sin previo aviso y sin posibilidad de estar preparado de antemano para ello. La única forma de estar a salvo de las piedras que caen de los tejados de los edificios antiguos es no visitarlos nunca, pero eso no resulta práctico ni está justificado. Cada año, millones de turistas visitan las iglesias antiguas de Florencia y el incidente de 2017 parece ser el único de este tipo registrado en los últimos tiempos.

Un colapso bajo el modelo de Hokusai no tiene por qué ser completamente repentino: puede avisar con cierta antelación, pero no con la suficiente como

para hacer algo que evite los daños del desastre. Un ejemplo especialmente impresionante es el relacionado con las balas de cañón disparadas durante las batallas de la época napoleónica. Donald Graves señala que: "Una característica del proyectil era que, cuando rebotaba en el suelo, a menudo parecía moverse lentamente. Los soldados desprevenidos, a veces intentaban detenerlo con sus pies, lo cual provocaba que sufrieran una amputación tan limpia como la que realiza cualquier cirujano" (Graves, 2009).

Si eras un soldado del ejército de Napoleón o del de Wellington el 18 de junio de 1815, poco podías hacer, salvo confiar en tu suerte para no ser alcanzado por un tiro y pasar a formar parte de las estadísticas de las bajas de ese día. Otro ejemplo de una situación en la que la mejor estrategia es no estar allí.

En otros casos, el tiempo de preaviso puede ser mucho mayor que el que da una bala de cañón que rebota, pero sigue siendo insuficiente para hacer algo para evitar el desastre. Consideremos el riesgo de la caída de grandes meteoritos. Existe un sistema de alerta temprana de meteoritos entrantes, casi desconocido para el público, gestionado por la NASA; se llama ATLAS (Asteroid Terrestrial-impact Last Alert System) (Proyecto ATLAS, 2018) y, según se informa, es capaz de proporcionar "una alerta con un día de antelación para un 'asesino de pueblos' de 30 kilotones, una con semana para un 'asesino de ciudades' de 5 megatones y una con tres semanas para un 'asesino de condados' de 100 megatones". Con este sistema, nos encontramos en una situación de ficción científica clásica: supongamos que el sistema facilita la información de que Nueva York va a ser golpeada por un meteorito de 5 megatones en una semana, ¿qué podrían hacer las autoridades? ¿Evacuar a millones de personas en una semana? ¿Y a dónde irían? Más aún, ¿creerían las autoridades a los científicos que lanzan la advertencia? o ¿no les acusarían más bien de "alarmistas", de vender catástrofes para ganar prestigio y becas de investigación? Sin embargo, en la historia se han destruido ciudades, si no por meteoritos al menos por cantidades equivalentes de energía generada por armas nucleares. En 1945, las fuerzas estadounidenses destruyeron las ciudades japonesas de Hiroshima y Nagasaki mediante el primer bombardeo nuclear de la historia. ¿Podría volver a ocurrir? Probablemente sí, pero dos casos no son suficientes para crear una distribución estadística.

Las catástrofes del modelo de Hokusai son raras e imprevisibles, pero eso

no significa que no podamos decir al menos algo sobre sus propiedades estadísticas. Algunas podrían denominarse “cisnes negros”, según la descripción de Nassim Taleb (2007). Estos sucesos forman parte de distribuciones estadísticas conocidas, pero extremas en cuanto a su gran tamaño y baja probabilidad. Por ejemplo, el terremoto de Tō*hoku de* 2011 fue muy grande, entre los más grandes jamás observados, pero no estaba fuera de la distribución de tamaño conocida de los terremotos. Se pudo calcular su probabilidad, al menos de forma aproximada, pero se consideró tan baja que no se tomó ninguna precaución dada la altura de las olas del tsunami asociado. Se trata, en efecto, de un cisne negro: un acontecimiento de baja probabilidad que normalmente se descarta, pero que puede ocurrir, y que de hecho ocurre.

Otros colapsos similares a los de Hokusai no solo son extremos, sino que están totalmente fuera de los límites del sistema en términos de las típicas leyes potenciales que rigen este tipo de fenómenos. Sornette acuñó el término “rey dragón” cuando señaló que el tamaño de la ciudad de París es tan grande que no se ajustaba a la ley de distribución de tamaños que une a todas las demás ciudades francesas (Sornette, 2009). Anteriormente, Jean Laherrère (1998) había observado el mismo fenómeno, pero utilizando solo el término “rey”. Por supuesto, París no es un colapso, pero es un buen ejemplo de anomalía en una distribución de probabilidad de ley potencial. Entre los ejemplos catastróficos de eventos “rey dragón” se encuentran los mayores sucesos de liberación de radiación que se producen en los accidentes de centrales nucleares, como en Chernóbil, las mayores caídas de los mercados financieros y algunas oscilaciones salvajes de los precios del mercado (Sornette, 2009).

No parece que existan modelos matemáticos para los “reyes dragones” del tipo que describe, por ejemplo, la curva de Séneca. Hay ecuaciones que pueden generar una curva que se parece un poco a la ola de Hokusai o a la forma de cualquier ola que se estrelle en la playa. Una de ellas es el oscilador de Duffing (Kanamaru, 2008), un oscilador no lineal forzado periódicamente. Es un ejercicio matemático interesante, pero no es algo que pueda utilizarse para predecir catástrofes en el mundo real. Lo único que podemos decir es que el universo no se mueve suavemente. Sabemos que tiende a disipar la entropía lo más rápido posible y que lo hace en ráfagas. Algunos de estos estallidos son muy grandes y se denominan acertadamente “reyes dragón”. Para los chinos,

un dragón es una entidad benévola que suele traer la lluvia; para los occidentales, es una criatura maligna que escupe fuego. Quizá el principio de máxima disipación de entropía sea el resultado del principio del yin y el yang, de que todas las cosas existen como opuestos inseparables y contrapuestos. Y así, de nuevo, es cómo funciona el universo.

LA VIDA DESPUÉS DEL PRECIPICIO: EL MODELO DEL REBOTE DE SÉNECA

Hasta ahora, hemos estado pensando en las amebas en una placa de Petri como un sistema estrictamente limitado en términos de recursos disponibles. Las hijas de Amelia pueden crecer, alcanzar su punto máximo y luego caer siguiendo diversas trayectorias, pero su destino es inevitable: cuando se les acaba el alimento, mueren, con la posibilidad adicional de asfixiarse en sus propios excrementos.

Pero supongamos que los recursos no son realmente de un solo uso; imaginemos que el experimentador es benévolo y misericordioso y no quiere que las amebas mueran. Así que sigue alimentando a las pequeñas criaturas en su placa de Petri y también les proporciona una forma de eliminar sus excrementos. Tal vez, las amebas podrían encontrarse viviendo en uno de esos ecosistemas autónomos que pueden crearse dentro de un recipiente de cristal sellado (Lotka, 1925). Estos recipientes son, sobre todo, objetos decorativos, pero las criaturas de su interior son capaces de sobrevivir durante algunos años. En este caso, el destino de las hijas de Amelia ya no tiene por qué ser apocalíptico: pueden sobrevivir si se adaptan a la limitada cantidad de alimentos y espacio disponibles. Eso no significa que no vayan a pasarlo mal en términos de picos y valles poblacionales, ya que al sobrepasar periódicamente la disponibilidad de alimentos, su población se desplomaría, para reiniciarse cuando se volviera a acumular comida. En biología, este tipo de ciclos se denomina "mecanismo Lotka-Volterra", por los nombres de los científicos que propusieron de forma independiente un modelo matemático para el crecimiento de sistemas biológicos y económicos simples (Volterra, 1926; Hall, 1998). Dado que el modelo contempla el retorno del crecimiento después de una caída que puede adoptar la forma de la curva de Séneca, también podemos llamarlo "rebote de Séneca".

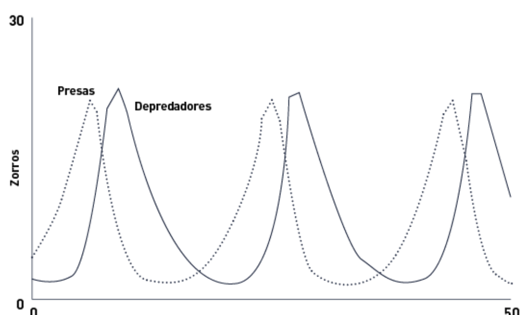
El modelo de Lotka-Volterra se denomina a menudo "presa-depredador"

pero también se conoce como el "modelo de zorros y conejos". Es curioso observar que ni Lotka ni Volterra pensaron nunca en términos de conejos y zorros ni de otras parejas especificas de presa-depredador. El modelo de Lotka se expresaba de forma muy abstracta y general, relacionada con la termodinámica de los sistemas vivos. Volterra, en cambio, desarrolló su modelo como una forma de explicar el comportamiento de las poblaciones de peces del mar Adriático, tal y como lo relató su yerno, un biólogo marino que estudió la costa italiana del Adriático durante la Primera Guerra Mundial. El destino de las ideas de Lotka y Volterra era similar al de las ideas de Jean Baptiste Lamarck sobre la evolución, de las que a menudo se dice que tienen que ver con el cuello de las jirafas, ¡pero Lamarck nunca mencionó las jirafas!

Llámese como se quiera, el modelo de Lotka-Volterra es muy similar al modelo de Hubbert que vimos anteriormente. La única diferencia es que en el modelo de Hubbert se supone que el recurso (el petróleo) no es renovable, mientras que en el de Lotka-Volterra el recurso (los conejos) puede volver a crecer después de haberse consumido. El resultado es que la curva de producción en forma de campana no termina en cero, sino que repunta una y otra vez en una serie infinita de oscilaciones. La población de depredadores (los zorros) consumirá periódicamente sus recursos (los conejos) tan rápido que los depredadores morirán de hambre. Entonces, con tan pocos zorros alrededor, la población de conejos volverá a crecer y, entonces, los numerosos conejos volverán a ser una presa fácil para la creciente población de zorros, y así sucesivamente, por siempre, al menos en el modelo (figura 13).

FIG**URA 13**

OSCILACIONES TÍPICAS EN LAS POBLACIONES DE UN SISTEMA ACOPLADO PRESA-PREDADOR SEGÚN EL MODELO DE LOTKA-VOLTERRA

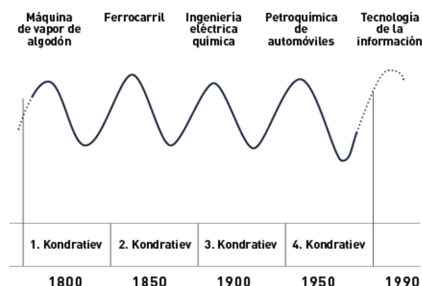


En la figura se ve un ejemplo típico de los resultados del modelo. En la versión más sencilla del modelo, estas oscilaciones son eternas, sin cambios. Observa las curvas en forma de campana de ambas poblaciones, pero también cómo las curvas de las presas (los conejos) disminuyen más rápido de lo que crecen. Esta es una de las manifestaciones del efecto Séneca, es un comportamiento típico de una población sometida a depredación. Nótese también que los zorros muestran un comportamiento diferente, disminuyendo lentamente. Esto se debe a que la cadena trófica, en el modelo, está formada por dos pasos solamente, es decir, el depredador no tiene depredadores. Así, los zorros mueren lentamente por inanición en lugar de hacerlo rápidamente al ser devorados por una población creciente de depredadores, como ocurre en cambio con los conejos.

El problema del modelo de Lotka-Volterra en esta forma simple es que no se conoce ninguna población salvaje que se comporte de esta manera (Serrouya, McLellan y Boutin, 2015). Se ha descubierto que el modelo es capaz de describir el comportamiento de poblaciones reales solo en condiciones de laboratorio muy específicas y controladas, con microorganismos como levaduras y bacterias. En algunos libros de texto se cuenta el caso del lince y la liebre de raqueta, poblaciones que podían medirse a grandes rasgos a través de los datos sobre el número de pieles que llevaban los cazadores a la Compañía de la Bahía de Hudson, en Canadá, entre 1845 y 1935. Un estudio más reciente trata de la población de alces y lobos en un parque de la Columbia Británica (Canadá) (Bernard et *al.*, 2014). En estos casos se observan oscilaciones, pero la concordancia con el modelo dista mucho de ser satisfactoria.

Todo esto no significa que el modelo de Lotka-Volterra sea inútil. Sabemos que el mapa no es el territorio y el modelo no es el sistema real. Se supone que el modelo de Lotka-Volterra nunca describió ecosistemas reales, pero se descubrió que funcionaba muy bien para algunos sistemas económicos, como para la pesca (Perissi et *al.*, 2017). Esto se debe a que el ecosistema industrial humano suele ser mucho más simple que un ecosistema biológico. Una entidad como la industria pesquera no tiene la increíble maraña de interacciones complejas que existen en los ecosistemas naturales (figura 14).

FIG**URA 14**
COMPORTAMIENTO ESQUEMÁTICO DE LAS ONDAS DE KONDRATIEV EN LA ECONOMÍA



Fuente: Adaptado de Rursus.

La historia está llena de ciclos y colapsos económicos: los economistas han jugado mucho con el asunto y podemos enumerar al menos ocho modelos de ciclo que tienen nombre (Bernard et *al.*, 2014):

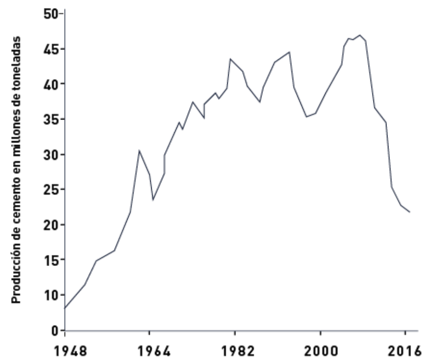
1. Kondratiev
2. Kuznets
3. Schumpeter
4. Kalecki
5. Goodwin
6. Kaldor y Minsky
7. Kitchin
8. Juglar

De estos, probablemente el más conocido es el de la onda de Kondratiev, del nombre del economista ruso Nikolai Dmitriyevich Kondratiev (1892- 1938). Observó las ondas largas de un periodo de algo más de 54 años que hoy llevan su nombre y que se atribuyen comúnmente al progreso tecnológico. Es decir, cada nueva invención genera un nuevo ciclo de crecimiento que luego se apaga cuando el mercado se satura, para reiniciarse como resultado de un nuevo invento.

Las ideas de Kondratiev fueron popularizadas por Schumpeter en La *teoría del desarrollo económico (19*34), y son bien conocidas en la actualidad. No cabe duda de que estos ciclos existen, pero su interpretación como resultado de las mejoras tecnológicas son al menos discutibles: ¿por qué el progreso debe seguir un ciclo? ¿Y por qué un ciclo regular de 54 años? Consideraciones similares son válidas para todos los demás ciclos que forman una notable fauna de estudios e interpretaciones. Como ejemplo, he aquí algunos datos del ciclo

de la producción de cemento en Italia (figura 15).

FIGURA 15
PRODUCCIÓN DE CEMENTO EN ITALIA EN MILLONES DE TONELADAS



Fuente: AITEC.

La curva puede interpretarse en términos de tres ciclos principales de producción, de unos 12 años de duración, con el primer pico en 1982, el segundo en 1994 y el tercero en 2007. Diez años después, en 2017, podría iniciarse un nuevo ciclo de crecimiento. Así pues, es posible que el mercado de la construcción de edificios en Italia esté sometido a ciclos a largo plazo y de duración variable que abarcan los últimos cuarenta años aproximadamente. Pero hay que tener en cuenta que no ha habido ninguna mejora tecnológica evidente en las formas de fabricar el cemento ni en la forma de construir los edificios que pueda explicar estos ciclos. En este caso, solo vemos factores económicos y de mercado en juego.

Estos ciclos podrían interpretarse cualitativamente mediante modelos similares al de Lotka-Volterra, donde podríamos considerar a la industria el "depredador" y al mercado la "presa". Lo que ocurre es que la industria explota el mercado para crecer, pero al hacerlo, tiende a saturar la demanda. Con una menor demanda, los beneficios caen, las inversiones disminuyen y, finalmente, toda la industria se reduce. Pero con el tiempo la demanda vuelve a un mercado que ha estado en declive durante un tiempo, y el ciclo se reinicia. Al final, no es diferente del caso de los zorros y los conejos. Es muy posible que los mismos factores económicos, y no los tecnológicos, estén en la base de los ciclos de Kondratiev.

Los economistas rara vez mencionan el modelo de Lotka-Volterra en sus trabajos. Esto se debe a que la ciencia, tal y como es hoy en día, está

fuertemente compartimentada y ningún científico quiere expandirse fuera de su área específica de competencia. En este caso, hay un conflicto permanente entre la economía estándar y el área en alza denominada "economía biofísica" o "econofísica". Los economistas tradicionales se resienten de lo que consideran una invasión de su campo por parte de los físicos y tienden a tomar decisiones que muestran a todo el mundo qué consigna están siguiendo. No obstante, en economía se utilizan ecuaciones diferenciales del tipo de las que están en la base de Lotka-Volterra (véase, por ejemplo, el modelo de Clark y Munro [1975] para la sobreexplotación de la pesca).

En general, podemos decir que los ciclos de crecimiento y declive existen tanto en los ecosistemas como en los sistemas económicos. Es, de nuevo, parte del funcionamiento del universo: todo lo que sube debe bajar y lo que baja puede subir. En la ciencia de los sistemas, podemos decir que un sistema complejo puede "orbitar" alrededor de un atractor de forma parecida a la de un planeta que orbita alrededor de una estrella. Así que podemos esperar que estos ciclos afecten a nuestras vidas y nos lleven de fases de optimismo a fases de desánimo y viceversa.

El problema de estos ciclos es que sería un gran error utilizarlos para hacer predicciones sobre el futuro. Son el resultado de la interacción de factores internos del complejo sistema que es la economía, pero pueden verse afectados por forzamientos externos que alteren la tendencia del sistema a mantenerse en torno al atractor. Así, los ciclos económicos aparentemente estables pueden verse perturbados por factores no relacionados con el mercado que actúan como forzamientos: el cambio climático y el agotamiento de los recursos, por ejemplo, pueden desestabilizar todo el sistema económico y hacer que los distintos elementos económicos que lo componen choquen entre sí, en lo que podría ser una guerra.

Por tanto, debemos tener en cuenta que los ciclos económicos existen, pero no debemos planificar nuestras actividades basándonos en la idea de que seguirán con la misma frecuencia e intensidad. Como ejemplo, el sector italiano de la construcción espera ahora mismo (2019) que un nuevo ciclo de crecimiento devuelva al mercado del cemento a la cúspide en la que se encontraba en 2007. Puede que así sea, pero, como siempre, tanto si se es ameba como si se es hombre, la mejor manera de hacer predicciones erróneas es asumir que el futuro será como el pasado.

BIBLIOGRAFÍA

Bak, P. (1996): Cómo *funciona la naturaleza. La ciencia de la criticalidad autoorganizada,* Nueva York, Copérnico.

Bak, P.; Tang, C. y Wiesenfeld, K. (1988): "Criticalidad autoorganizada", Phy*sical Review A,* vol. 38, pp. 364-374.

Bardi, U. (2005): "La economía mineral: un modelo para la forma de las curvas de producción de petróleo", Ene*rgy Policy,* vol. 33, pp. 53-61.

— (2011): "El efecto Séneca: por qué el declive es más rápido que el crecimiento", Cas*sandra's Legacy,* https://cassandralegacy.blogspot.com/.

— (2015): "Inanna y Ebih: ¿un informe de una antigua catástrofe ecológica?", https://bit.ly/39vw1oH.

— (2017): El *efecto Séneca. Por qué el crecimiento es lento pero el colapso es rápido,* Luxemburgo, Springer Verlag.

— (2019): "El pico del petróleo, 20 años después: ¿previsión fallida o visión útil?", Ene*rgy Research & Social Science,* vol. 48, pp. 257-261.

— (2019): "Una nueva investigación determina los límites últimos de las energías renovables: La esfera Bardi", Cas*sandra's Legacy,* https://cassandralegacy.blogspot.com/.

— (2019): "¿Por qué los periódicos se han vuelto tan malos? hay una razón: es otro caso del 'efecto Séneca'", Cas*sandra's Legacy,* https://cassandralegacy.blogspot.com/.

Berman, A. (2016): "El milagro del gas de esquisto", parte I, https://www.artberman.com/.

Bernard et *al.* (2014): "Long-wave economic cycles: the contributions of Kondratieff, Kuznets, Schumpeter, Kalecki, Goodwin, Kaldor, and Minsky", Soc*ial Studies.*

Black et *al.* (1998): "Inana y Ebih translation", The Electronic Text Corpus of Sumerian Literature, http://etcsl.orinst.ox.ac.uk/section1/tr132.htm.

Bloomfield et *al.* (2010): "Sex determination in the social amoeba Dic*tyostelium discoideum*", Science, vol. 330, pp. 1533-1536.

Brock et *al.* (2011): "Agricultura primitiva en una ameba social", Na*ture,* vol. 469, pp. 393-396.

Campbell, C. J. y Laherrère, J. F. (1998): "El fin del petróleo barato", Sci*entific American.*

Clark, C. W. y Munro, G. R. (1975): "The economics of fishing and modern capital theory: A simplified approach", Jou*rnal of Environmental Economics and Management,* vol. 2, pp. 92-106.

De Shong Meador, B. (2009): Pri*ncesa, Sacerdotisa, Poeta,* Austin, University of Texas Press.

Gao, J.; Barzel, B. y Barabási, A.-L. (2016): "Universal resilience patterns in complex networks", Na*ture,* vol. 530, pp. 307-312.

Gordon, J. E. (1978): Str*uctures or Why Things Don't Fall Down,* Boston, Da Capo Press.

Graves, D. (2009): "Field artillery of the War of 1812: equipment, organization, tactics and effectiveness", The Napoleon Series, The *War of 1812 Magazine.*

Guseo, R. (2011): "Producciones mundiales de petróleo barato y pesado: un modelo energético a largo plazo", Ene*rgy Policy,* vol. 39, pp. 5572-5577.

Gutenberg, B. y Richter, C. F. (1954): Sei*smicity of the Earth and Associated Phenomen,* Nueva Jersey, Princeton University Press.

Hall, C. A. (1988): "Una evaluación de varios de los modelos teóricos históricamente más influyentes utilizados en ecología y de los datos aportados en su apoyo", Eco*logical Modelling,* vol. 43, pp. 5-31.

Hall, C. A.; Cleveland, C. J. y Kaufmann, R. (1986): Ene*rgy and Resource Quality: the Ecology of the Economic Process,* Nueva Jersey, Wiley Interscience.

HUBBERT, M. (1956): "La energía nuclear y los combustibles fósiles", San Antonio, Texas, Spring Meeting of the Southern District, American Petroleum Institute.
KANAMARU, T. (2008): "Duffing oscilante", *Scholarpedia*, vol. 3, p. 6327.
LAHERRÈRE, J. (2000): "La curva de Hubbert: sus puntos fuertes y débiles", *Oil & Gas Journal*.
LAHERRÈRE, J. y SORNETTE, D. (1998): "Stretched exponential distributions in nature and economy: 'fat tails' with characteristic scales", *European Physical Journal B-Condens*, B2, pp. 525-539.
LOTKA, A. J. (1925): "Elementos de Biología Física", *American Journal of Public Health*, https://bit.ly/39sH22W.
MALTHUS, T. (1798): *An essay on the principle of population: Or, a view of its past and present effects on human happiness*, Londres, J. Johnson.
MARCHETTI, C. (2008): "Logistic curves in world history: marchetti and gell-mann", *Cambridge Forecast Group Blog*, https://bit.ly/3aYe2jS.
MCCONNELL, J. R. *et al.* (2018): "La contaminación por plomo registrada en el hielo de Groenlandia indica que las emisiones europeas rastrearon plagas, guerras y la expansión imperial durante la Antigüedad", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 115, pp. 5726- 5731.
MEADOWS, D. (2008): *Pensar en sistemas*, Madrid, Capitán Swing Libros.
MEADOWS ET *al.* (1972): *Los límites del crecimiento*, Nueva York, Universe Books.
MEYER-GUTBROD, E. L. y GREENE, C. H. (2018): "Recuperación incierta de la ballena franca del Atlántico Norte en un océano cambiante", *Global Change Biology*, vol. 24, pp. 455-464.
MILLS, A. A.; Day, S. y PARKES, S. (1996): "Mecánica del reloj de arena", *European Journal of Physics*, vol. 17, pp. 97-109.
MONTILLO, R. (2013): "La truculenta y verdadera inspiración detrás de 'Frankenstein'", *The Huffington Post*, https://bit.ly/3tZO9qL.
ODUM, H. T. T. (1988): "Autoorganización, transformidad e información", *Ciencia*, vol. 242, nº 80, pp. 1132-1139.
PARETO, V. (1896): *La courbe de la répartition de la richesse, Œuvres complètes*, tomo III, Ginebra, 1967 III.
PERISSI ET *al.* (2016): "Dynamic patterns of overexploitation in fisheries", Cornell University, http://arxiv.org/abs/1610.03653.
— (2017): "DYNamic patterns of overexploitation in fisheries", *Ecological Modelling*, vol. 359.
PRATS, J. (2011): "Harry Potter y la cola gruesa de Pareto", *Significance*.
PRIGOGINE, I. (1968): "Inestabilidades que rompen la simetría en sistemas disipativos", *Journal of Chemical Physics*, vol. 48, p. 1695.
RAUGEI, M. (2019): "El análisis de la energía neta no debe comparar manzanas y naranjas", *National Energy*, vol. 4, pp. 86-88.
RICARDO, D. (2005): *Las obras y la correspondencia de David Ricardo*, Indianápolis, Liberty Fund.
RODDIER, F. (2012): *Thermodynamiqe de l'évolution*, La-Seyne-sur-Mer, Parole.
— (2019): "El fenómeno de la condensación de las riquezas", *Point de vue d'un astronome*, http://www.francois-roddier.fr/?p=945.
S. A. (2017): "Turista muerto por la caída de una piedra en la basílica de Florencia", ANSA, https://bit.ly/3tEBHw5.
SCHUMPETER, J. A. y OPIE, R. (1934): *The theory of economic development: An inquiry into profits, capital, credit, interest, and the business cycle*, Cambridge, Harvard University Press.
SCOTT BAKER, C. y CLAPHAM, P. J. (2004): "Modelling the past and future of whales and whaling", *Trends in*

Ecology & Evolution, vol. 19, pp. 365-371.

Serrouya, R.; McLellan, B. N. y Boutin, S. (2015): "Testing predator-prey theory using broad-scale manipulations and independent validation", *Journal of Animal Ecology*, vol. 84, pp. 1600-1609.

Sgouridis, S.; Bardi, U. y Csala, D. (2016): "The sower's way. quantifying the narrowing net-energy pathways to a global energy transition", Cornell University, arXiv:1410.7172.

Solow, R. (1956): "El cambio técnico y la función de producción agregada", *Quarterly Journal of Economics*, vol. 70, pp. 65-94.

Sondland, G. (2019): "La lucha por la seguridad energética de la UE", *Politico*.

Sornette, D. (2009): "Dragon-Kings, Black Swans and the Prediction of Crises", Cornell University, arXiv:0907.4290v1.

Sweeney, L. B. y Sterman, J. D. (2000): "La dinámica de la bañera: resultados iniciales de un inventario de pensamiento sistémico", *System Dynamics Review*, vol. 16, pp. 249-286.

Taagepera, R. (1979): "Tamaño y duración de los imperios: curvas de crecimiento- declive, 600 a. C.-600 d. C.", *Social Science History*, vol. 3, p. 115.

Taleb, N. (2007): *El cisne negro*, Nueva York, Random House.

Todar, K. (2020): "Crecimiento de poblaciones bacterianas", *Todar's Online Textbook of Bacteriology*, https://bit.ly/3O8TyDo.

Volterra, V. (1926): "Fluctuaciones en la abundancia de una especie considerada matemáticamente", *Nature*, vol. 118, pp. 558-560.

Zubrin, R. (2013): *Mercaderes de la desesperación*, Nueva York, Encounter Books.

3. LA PRÁCTICA DEL COLAPSO

Lamento de verdad que el dominio del hombre
haya roto la unión social de la naturaleza
y justifique esa mala opinión
que te hace sobresaltar.
¡A mí, tu pobre compañero nacido en la tierra
y compañero mortal!
Robert Burns, A u*n ratón, 1*785

EL COLAPSO DE LAS ESTRUCTURAS DE INGENIERÍA: POLVO ERES Y EN POLVO TE CONVERTIRÁS

A última hora de la mañana del 14 de agosto de 2018 estaba ocupado escribiendo este libro cuando, por casualidad, abrí mi navegador. Allí vi las imágenes del derrumbe del puente Morandi, en Génova, casi en tiempo real. Fue un gran desastre: el puente solían atravesarlo por más de 25 millones de vehículos al año y era un enlace comercial vital entre Italia y el sur de Francia. Cuando se derrumbó, no solo se llevó la vida de 43 personas que lo cruzaban, sino que supuso nada menos que un golpe para el sistema de autopistas italiano, obligando a desviar el tráfico desde y hacia Francia y dar un largo rodeo. Pasarán años antes de que se pueda construir un nuevo puente y los daños económicos son incalculables.

¿Cómo es posible que los ingenieros que se encargaban del mantenimiento de la autopista no pudieran predecir y contrastar el colapso de una estructura tan importante? En el debate posterior se habló mucho de incompetencia o de corrupción. Tal vez el hecho de que el mantenimiento de la autopista se entregara a una empresa con ánimo de lucro fuera una receta para el desastre: la maximización de los beneficios bien pudo llevar a recortar las tareas de mantenimiento. Sin embargo, no tenemos pruebas de que la empresa que gestionaba el puente fuera culpable de negligencia criminal; más bien, el colapso del puente Morandi puede verse como un ejemplo más de cómo el comportamiento de los sistemas complejos tiende a pillar a la gente por sorpresa.

Incluso en ingeniería, con todo su énfasis en la cuantificación, las medidas,

los modelos y el conocimiento, el fenómeno que llamamos "colapso" o "fractura" sigue siendo algo que no se domina del todo. Si los ingenieros supieran exactamente cómo tratar las fracturas, nunca se rompería nada, pero, por desgracia, muchas cosas lo hacen, como todos sabemos. Hemos visto anteriormente que los fenómenos críticos en una red pueden iniciarse por pequeños defectos en la estructura, es el efecto de las grietas en las estructuras del mundo real, según la teoría desarrollada por Alan Griffith (1921). El puente Morandi era una estructura sometida a tensiones, sensible al mecanismo mortal de la falla de Griffith. El puente se vino abajo durante una fuerte tormenta eléctrica y ese pudo ser el detonante que inició la cascada de fallos que condenó el puente: un caso más del fenómeno del "crujido dinámico" que lleva al precipicio de Séneca. En algún lugar, en uno de los cables que sujetaban el tablero, tuvo que haber un punto débil, una grieta. Entonces, tal vez como efecto de un rayo, o tal vez del viento, el cable se partió. En ese momento, los demás cables se vieron repentinamente sometidos a una mayor tensión, lo que generó una cascada de fallos en estos que, finalmente, provocó la caída de toda una sección del puente. Si hemos oído hablar de la gota que colmó el vaso, en este caso, podríamos hablar del rayo que rompió el tramo del puente. Los sistemas complejos no solo te sorprenden con frecuencia. A veces, te matan.

Pero ¿por qué el puente Morandi estaba tan debilitado? Al igual que muchos otros puentes de Italia y Europa, se había construido con hormigón precomprimido. Se trata de un material que parece gustar mucho más a los ingenieros europeos que a sus colegas estadounidenses que, por el contrario, tienden a utilizar cables y vigas de acero desnudos. El hormigón precomprimido tuvo más éxito en Europa porque se creía que protegería las vigas de acero internas de la corrosión y evitaría la necesidad del laborioso trabajo de mantenimiento de pintura y repintado que se requiere, en cambio, para los puentes de acero. Sin embargo, con el paso de los años, se descubrió que el acero se corroe incluso dentro del hormigón y eso resulta ser un problema gigantesco no solo para los puentes.

En el caso del puente Morandi de Génova, el problema ya se sabía. El puente se había inaugurado en 1967 y, tras más de cincuenta años de servicio, necesitaba mucha atención y mantenimiento. Años antes del derrumbe, los ingenieros habían observado que la corrosión y la tensión de las vibraciones

causadas por el tráfico pesado habían debilitado las vigas de acero de la sección específica que caería en 2018. Una serie de mediciones realizadas un año antes del derrumbe habían indicado que el acero de esa sección había perdido entre el 10 y el 20% de su integridad estructural, lo cual no se consideró lo suficientemente peligroso como para que se requiriese el cierre del puente al tráfico, sobre todo en plena temporada de verano; al fin y al cabo, la mayoría de los edificios se construyen con un fuerte margen de seguridad respecto a su límite de colapso, normalmente al menos del 100%, aun así había un plan para cerrar el puente por trabajos de mantenimiento en octubre de 2018. Demasiado tarde.

Vemos una vez más que los mejores planes de ratones y hombres suelen ir por mal camino. Los ingenieros que trabajaban en el puente podían haber cometido un error típico del pensamiento lineal: asumieron que hay una cierta proporcionalidad entre el debilitamiento y el peligro. En este caso, creyeron que un debilitamiento del 20% de las vigas no era suficiente para provocar el derrumbe del puente. Pero eso era una media y a los sistemas complejos pueden no importarles las medias: ¿conoces la historia del estadístico que se ahogó en un río de una profundidad media de 1,5 metros?

Los puentes son solo un ejemplo de las muchas estructuras de ingeniería sujetas a colapsar bajo tensión. El mecanismo Griffith de propagación de grietas es típico de la fractura de estructuras sometidas a esfuerzos de tracción, como las vigas de un puente colgante, las vigas de un tejado, objetos en movimiento como aviones y barcos, objetos cotidianos como estanterías e incluso los huesos de los seres vivos. Estas estructuras tienden a derrumbarse de forma rápida, repentina y a veces explosiva, ejemplos típicos de colapsos de Séneca. También existe otra categoría de estructuras de ingeniería, las que solo deben soportar esfuerzos de compresión: es el caso de los pilares, las paredes, los arcos, las cúpulas y las patas de la silla en la que uno se sienta. Estas estructuras pueden derrumbarse, pero normalmente son mucho más seguras que las que están sometidas a tensión porque la compresión tiende a cerrar las grietas en lugar de agrandarlas, como hace la tensión.

En la Antigüedad, cuando no existía el hormigón armado, los edificios se construían de forma que se evitara todo tipo de esfuerzos de tracción en la medida de lo posible. Esto se debía a que el principal material de construcción disponible era la piedra y esta no puede soportar los esfuerzos de tracción. Así, las piedras pueden utilizarse para construir muros y contrafuertes, y también

para puentes y tejados, siempre que se dispongan con cuidado para formar arcos y cúpulas con el fin de asegurarse de que todos los elementos estén siempre bajo compresión, nunca bajo tensión.

Pero incluso las estructuras de compresión tienen sus límites. Los antiguos constructores eran perfectamente conscientes de que la piedra podía desmoronarse, incluso reventar, cuando se sometía a una tensión excesiva. Esto provoca que exista un límite a la altura de un edificio de piedra: a partir de cierta altura, las piedras de la base revientan y hacen caer toda la estructura. Una de las artes que los antiguos constructores necesitaban conocer era la capacidad de comprobar la resistencia de las piedras a la compresión y, para ello, habían desarrollado sofisticadas técnicas de medición para determinar esta propiedad. Tal vez, nuestra percepción esté sesgada, ya que lo que vemos a nuestro alrededor son solo aquellos edificios antiguos que sobrevivieron y llegaron a nuestros tiempos, pero es cierto que muchos edificios antiguos han sobrevivido maravillosamente a la prueba del tiempo y siguen a nuestro alrededor después de varios siglos, incluso milenios.

Muchos puentes romanos siguen en pie y se siguen utilizando. Otro ejemplo notable de un edificio que ha sobrevivido de la época romana es el templo del Panteón, en Roma. Se construyó hace casi 2.000 años y todavía se utiliza como templo, ahora es una iglesia católica. Las catedrales góticas construidas durante la Edad Media también eran robustas y resistentes: hay pocos ejemplos de derrumbes estructurales causados por un mal diseño. Por ejemplo, la catedral de Beauvais, en Francia, construida principalmente durante el siglo XIII, sufrió muchos problemas y algunos derrumbes estructurales, pero sigue en pie hoy en día. Otro ejemplo es la torre de Pisa, en Italia, construida en el siglo XIV. Durante siglos sobrevivió a la inclinación provocada por los movimientos del terreno. En el siglo XX, la inclinación alcanzó un ángulo de 5,5°, con lo que la torre corría el riesgo de derrumbarse. En la actualidad, esta se ha reducido a menos de 4° actuando sobre los cimientos, permitiendo que la torre puede seguir en pie durante más siglos en el futuro. Los edificios modernos de piedra son a veces incluso más ambiciosos. El Monumento a Washington, en Washington DC, es un ejemplo de edificio lo suficientemente alto (169 m) como para acercarse a los límites de la resistencia estructural de las piedras de su base. Se terminó de construir en 1884 y parece que sigue en buen estado a pesar de algunas grietas que desarrolló tras un terremoto en 2011.

Como última nota sobre esta clasificación, podría mencionar el "colapso de Euler", un modelo que mezcla parte de los elementos de tracción y parte de los de compresión del mecanismo de fractura. Se produce cuando una estructura de poco grosor es sometida a compresión y, como consecuencia, se tuerce lateralmente. Un ejemplo es lo que puede ocurrir cuando se camina con tacones altos. Los esfuerzos de tracción en el tacón pueden romperlo en la unión con la suela o, en el peor de los casos, fracturar el tobillo del usuario. Llevar tacones altos es peligroso, pero a muchas personas parece gustarles la idea. Puedo contarles que una vez estuve en una ciudad rusa en invierno y vi a una joven con tacones altos corriendo para coger un autobús sobre la acera helada, saltando dentro con gracia y aparentemente a gusto. Cómo pudo hacer eso sin resbalar en el hielo y matarse o ser atropellada por el autobús sigue siendo un misterio para mí hasta la fecha. Quizá haya que ser ruso para poder hacer ciertas cosas. Pero los humanos son sistemas complejos y los sistemas complejos siempre te pillan por sorpresa.

Pero volvamos al caso del puente Morandi para hablar de la evaluación de riesgos sobre las estructuras de ingeniería. He cruzado ese puente en coche varias veces a lo largo de mi vida sin pensar siquiera vagamente que era arriesgado hacerlo. Probablemente, al menos mil millones de vehículos cruzaron con seguridad ese puente a lo largo de su más de medio siglo de vida, por lo que la probabilidad de verlo derrumbarse justo cuando se estaba cruzando era abismalmente baja. Sin embargo, ocurrió en 2018, y cuando un puente importante se derrumba, alguien, con seguridad, está cruzándolo. Obviamente, no habría tenido sentido evitar cruzar el puente Morandi, o cualquier otro puente de hormigón, por miedo a que se derrumbase; no obstante, parece tener todo el sentido del mundo considerar el riesgo de derrumbe de un edificio que se utiliza mucho más a menudo que los puentes: tu casa o el lugar donde trabajas. Por desgracia, normalmente no se tiene ni idea de lo bien y cuidadosamente que se ha construido y mantenido una casa. Puede que se hayan respetado todas las normas o puede que no y en el segundo caso, tu vida está en peligro: el derrumbe que te espera puede ser rápido y mortal.

Hay muchos casos en los que se ha descubierto, normalmente tras el derrumbe de una estructura, que los constructores habían ahorrado dinero reduciendo la cantidad de acero de refuerzo para el hormigón, o tal vez utilizando arena de mala calidad, un truco típico para ahorrar dinero es utilizar

arena extraída de alguna playa. Esta arena está contaminada con sal marina y eso favorece la corrosión de las vigas de acero dentro del hormigón. En algunos casos, se ha informado de que en lugar de las vigas de acero habituales los constructores utilizaron mallas metálicas del tipo utilizado para los gallineros. Además, hay que tener en cuenta que un edificio rara vez permanece intacto después de su construcción. La gente construye puertas y ventanas en las paredes, añade más pisos, elimina paredes o las añade. También se puede intervenir de otras formas peligrosas: por ejemplo, a todo el mundo le gustan las piscinas en la azotea, pero son pesadas y pueden desestabilizar toda la estructura de un edificio. Estos edificios híbridos pueden ser muy peligrosos: una de las peores catástrofes de la historia de la arquitectura se produjo en un edificio que se modificó y amplió sin respetar demasiado las normas ni el sentido común. Es el caso del derrumbe del Rana Plaza el 24 de abril de 2013 en Savar, un distrito de Bangladesh, en el que murieron más de mil personas y más de 2.500 resultaron heridas. Los propietarios habían añadido cuatro pisos al edificio sin permiso (¡!) y además habían colocado la maquinaria pesada de una fábrica de ropa en estos pisos extra. La maquinaria no solo era pesada, sino que además generaba fuertes vibraciones que debilitaron aún más el edificio. Más de la mitad de las víctimas eran trabajadoras de la fábrica, junto con varios de sus hijos que estaban en guarderías dentro del inmueble. Un perfecto ejemplo de negligencia criminal.

Los derrumbes de edificios son poco frecuentes, por lo que el riesgo es tan pequeño que no suele figurar en las distintas tablas de "probabilidades de morir" que se pueden encontrar en Internet (Injury Facts, 2019). Sin embargo, es uno de esos riesgos para los que se pueden tomar precauciones y no hay razón para no hacerlo. Si vives en un edificio de hormigón armado que tiene más de un par de décadas, deberías comprobar los detalles que pueden ser indicativos de peligro. En algunos casos, se puede ver directamente la corrosión de las vigas de acero donde se ha erosionado el hormigón circundante. Las grietas en las paredes son un síntoma evidente de problemas y se ha informado de que el ruido de un cable de acero que se abre en el interior de una viga de hormigón puede percibirse como el ruido de unos disparos. En Europa, si se oye ese tipo de ruido, se puede pensar razonablemente que hay algún problema con la integridad estructural del edificio en el que se vive, aunque, por supuesto, los disparos pueden ser

mucho más probables si se vive en los Estados Unidos. Por cierto, el derrumbe del puente Morandi dio lugar a ruidos que podían interpretarse como explosiones y, ¡adivina qué!, que llevaron a algunas personas a interpretar este desastre como el resultado de una "demolición controlada" llevada a cabo por los malvados "Illuminati sionistas", en analogía con las teorías de demolición propuestas para el ataque de 2001 al World Trade Center de Nueva York. La fantasía humana parece no tener límites en cuanto a teorías descabelladas se refiere.

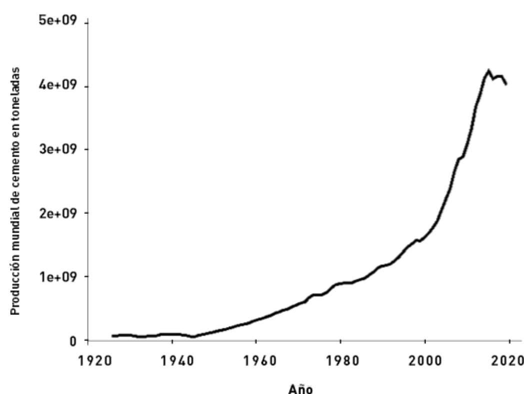
No ver ni oír nada sospechoso en un edificio no necesariamente significa que este sea seguro. Si tiene más de cincuenta años, no sería mala idea buscar ayuda profesional para comprobar su integridad estructural. Sin embargo, es caro y no se hace habitualmente en los edificios privados. Los edificios de piedra suelen ser más seguros y duraderos que los de hormigón; sin embargo, hay que tener cuidado, porque estos edificios pueden desmoronarse bajo el efecto de las vibraciones laterales generadas por los terremotos. Se suele decir que las casas de madera son más resistentes y seguras que los edificios de hormigón y de piedra, y probablemente sea cierto, dentro de ciertos límites. Pero hay que tener en cuenta que las vigas de madera también son susceptibles de degradarse: pueden ser atacadas por las termitas y su presencia puede ser difícil de detectar porque corroen el interior de la madera antes de salir a la superficie. En términos de seguridad estructural, un tipi indio o una yurta mongola serían la mejor opción para vivir. De otro modo, solo hay que aceptar que hay algunos riesgos en la vida.

A fin de cuentas, el problema de la degradación del hormigón no se da en edificios aislados: es un problema global que afecta a todas las infraestructuras construidas desde hace aproximadamente un siglo (figura 16).

En el gráfico se ve como la producción de hormigón experimentó un crecimiento exponencial desde 1920 hasta hace unos pocos años. Solo en 2015 la producción mundial de hormigón empezó a mostrar signos de estabilización y, probablemente, bajará en los próximos años. Esto significa que nuestras autopistas y nuestras ciudades se construyeron en un periodo de expansión económica y bajo el supuesto de que las necesidades de su mantenimiento serían mínimas, al igual que lo fueron para la generación anterior de edificios de piedra. Resultó ser una estimación errónea.

FIG**URA 16**

PRODUCCIÓN MUNDIAL DE CEMENTO



Fuente: USGS.

En el futuro, corremos el grave riesgo de que se produzca una epidemia de derrumbes de infraestructuras si no destinamos suficientes recursos al mantenimiento de sus elementos de hormigón. De lo contrario, el resultado podría ser que una parte considerable de los edificios y las carreteras del mundo tuvieran que ser precintados y abandonados a su suerte. Peor aún, cruzar un puente o vivir en un rascacielos podría llegar a considerarse un riesgo. Esta situación se da ya en algunos países pobres. En Cuba, tras la revolución de 1959, el Gobierno expropió la mayoría de los edificios que habían sido propiedad de cubanos y extranjeros ricos y los repartió entre los pobres. El problema es que estos edificios se habían levantado con cemento Portland hecho con arena de playa contaminada con sal marina. La sal marina favorece la corrosión de las vigas de acero: un problema muy grave. Se puede remediar, pero es caro y requiere tecnologías sofisticadas (Carvajal et *al.*, 2012) que los cubanos no pueden permitirse hoy en día. Los problemas de los viejos edificios de hormigón en los países pobres no parecen estar relacionados con una ideología política o un sistema de gobierno concretos. Puerto Rico está bajo el control del Gobierno estadounidense, pero el problema del desmoronamiento de los edificios parece ser el mismo que en Cuba (*Globe Gazette*, 2017), agravado en los últimos tiempos por el huracán María que azotó la isla en 2017 (Lugo, 2019). Otras zonas cercanas al mar y con climas cálidos parecen estar afectadas de la misma manera.

Carecemos de datos estadísticos a nivel mundial sobre este tipo de problemas, pero parece existir un "cinturón de ruina" de edificios en decadencia en todas las regiones tropicales, especialmente cerca del mar,

donde las temperaturas más altas y la sal marina esparcida por el viento hacen que las vigas de acero de los edificios de hormigón se corroan más rápidamente que en otras regiones del mundo; casualmente, el puente Morandi estaba cerca de la costa mediterránea y es muy posible que en ese caso también la sal marina influyera en su derrumbe. Si a esto le añadimos que en muchas de estas regiones la gente es pobre y no puede permitirse los costes que conlleva la rehabilitación de estos edificios viejos, tenemos un gran problema global: otro precipicio de Séneca a la espera.

Al final, el problema tiene que ver con una antigua máxima bíblica: "polvo eres y en polvo te convertirás". Aplicada a una estructura de hormigón, sonaría más como "arena eres y en arena te convertirás". El hormigón no es más que arena compactada, como los castillos de arena que construyen los niños en la playa. La sustancia que aglutina la arena en los castillos de arena es el agua y cuando se evapora, el castillo se desmorona. En el hormigón, el aglutinante es el cemento, que suele ser cal o silicato de calcio. Por supuesto, este tipo de aglutinante sólido no se evapora y el hormigón dura mucho más que los castillos de arena, pero no para siempre. Así que lo que vemos hoy en Cuba y otros países tropicales pobres puede ser solo una imagen de lo que será nuestro mundo en un futuro no tan lejano.

El riesgo de colapso afecta a todo tipo de estructuras de ingeniería, no solo edificios. Entre los innumerables objetos que el hombre construye, muchos son especialmente peligrosos porque se mueven, a veces muy rápido. Según las estadísticas disponibles, los peatones son las víctimas más probables de los accidentes en la calle, mientras que el tipo de vehículo más peligroso son las motocicletas. La probabilidad de morir en un accidente de coche en Estados Unidos es de aproximadamente 1 entre 10.000 cada año, un dato del que no consideramos que merezca la pena preocuparse a pesar de que la mayoría de nosotros utilizamos normalmente el coche y caminamos por calles donde existe el riesgo de ser atropellado. Los aviones son significativamente menos peligrosos que los coches; Según los economistas (B. R., 2015), el valor típico de la probabilidad de morir en un accidente aéreo es de una entre cinco millones por vuelo. Incluso si se tomara un vuelo todos los días durante un año, la probabilidad de morir en un accidente sería inferior a una entre 10.000, no merece realmente la pena preocuparse.

Aunque estas probabilidades son pequeñas, no son despreciables y la mayoría de nosotros tenemos familiares o amigos que han sufrido un

accidente grave de tráfico por carretera. La cuestión es cómo reducir las posibilidades de verse implicado en uno. En el caso del desplazamiento por carretera, hay muchas normas y recomendaciones bien conocidas sobre las cosas que se deben y no se deben hacer al ponerse al volante. Pero cuando se viaja en un vehículo conducido por otra persona, por ejemplo, cuando se toma un autobús, no se tiene idea de la competencia de la persona al volante: el conductor puede ser incompetente, estar borracho, bajo el efecto de fuertes drogas o, peor aún, albergar pensamientos suicidas. En este punto, quizá convenga recordar las recomendaciones que hace Jared Diamond en su libro El *mundo hasta ayer (20*13), donde nos cuenta que estuvo a punto de ahogarse cuando una pequeña embarcación en la que viajaban él y unas cuantas personas más se hundió por culpa de un piloto imprudente de Nueva Guinea. Diamond señala que debería haberse dado cuenta de que había problemas en esa embarcación antes de subir a ella si hubiera practicado el arte que observó en sus amigos neoguineanos y que él llama "paranoia constructiva". Se trata de un conjunto de hábitos que implican una atención extrema a los detalles de personas y objetos potencialmente peligrosos, desarrollados por quienes viven en entornos más difíciles que los típicos de nuestra experiencia como occidentales. En general, sin embargo, no se puede utilizar la paranoia como forma de gestionar la vida. Tienes que aceptar que la seguridad perfecta es algo que solo puedes tener dentro de la tumba.

No obstante, puedes mejorar tus posibilidades de sobrevivir si adoptas una cierta actitud crítica a la hora de elegir tu sistema de transporte. Se discute mucho sobre si unas aerolíneas son más seguras que otras, pero la comparación suele ser difícil porque hay muchos factores en juego: la ruta, el tipo de aviones, el número de vuelos, pero, sobre todo, porque el número de catástrofes en el sector de las aerolíneas es tan pequeño (afortunadamente) que una comparación estadísticamente significativa es casi imposible. También es cierto que no todos los aviones son iguales y se podría pensar que se puede elegir un vuelo en función del modelo de avión que se vaya a utilizar. Pero esto rara vez se especifica en el billete y puede ser objeto de cambio, según las necesidades de la aerolínea. Cuando se compra un billete de avión, se acepta automáticamente el contrato denominado "condiciones de transporte", que suele ser un documento farragoso que nadie lee nunca. En Estados Unidos, cada compañía aérea tiene un contrato diferente, pero suelen ser muy

similares. Por ejemplo, las condiciones de transporte de la aerolínea Delta en 2017 especificaban que "Delta puede sustituir a otras aerolíneas o el avión, retrasar o cancelar los vuelos, cambiar la asignación de asientos y modificar u omitir las escalas indicadas en el billete en cualquier momento" (McGee, 2017). Los horarios están sujetos a cambios sin previo aviso. Y fijémonos en que ni siquiera dicen que te llevarán en avión; solo mencionan "transportes alternativos", que bien podría ser una caravana de camellos. Afortunadamente, eso no ocurre muy a menudo.

Por lo tanto, no tienes forma de saber qué tipo de avión utilizará la compañía que has elegido, ni si será un avión nuevo o uno viejo, y si podría haber tenido problemas de mantenimiento en el pasado. Por ejemplo, las personas que subieron al vuelo 243 de Aloha Airlines en ruta de Hilo a Honolulu en 1988 no tenían forma de saber que el avión —una versión antigua del Boeing 737— tenía un problema grave. Al haber sido empleado durante varios años en esa ruta, se vio sometido a un número mucho mayor de ciclos de compresión y descompresión que otros aviones similares empleados en trayectos más largos. Estos numerosos ciclos habían debilitado el casco y como resultado el avión perdió parte del fuselaje en pleno vuelo. Fue otro caso de fallo crítico generado por el mecanismo de expansión de una grieta de Griffith. En ese caso, afortunadamente, los pilotos consiguieron aterrizar el avión averiado en Honolulu, todavía de una sola pieza, aunque con un gran trozo del fuselaje menos. Las fotos tomadas tras el aterrizaje muestran a los pasajeros todavía sentados en sus asientos al aire libre, era como si el avión se hubiera convertido en un coche descapotable. Solo podemos imaginar vagamente lo que debieron sentir estas personas al encontrarse, literalmente, sentadas en medio del cielo cuando el avión se abrió como una lata. Lamentablemente, una de las azafatas de vuelo murió al ser expulsada del avión, pero la supervivencia de los pasajeros y del resto de la tripulación fue nada menos que un pequeño milagro.

En ocasiones, sin embargo, sí que puedes elegir a qué avión subir. Seguro que has oído hablar del reciente caso de los accidentes de dos aviones Boeing 737 Max en 2019, causados, probablemente, por un diseño defectuoso del sof*tware de* control (Glanz, Kaplan y Nicas, 2019). Varios organismos reguladores estatales de todo el mundo dejaron en tierra todos los aviones 737 Max inmediatamente, pero en Estados Unidos el avión siguió volando durante

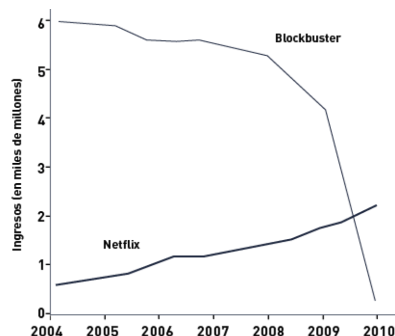
algunos días. En aquel caso, se podía elegir si volar con una aerolínea que todavía utilizaba el Boeing 737 o no. Se podría haber sido lo suficientemente paranoico como para elegir una aerolínea europea o china en lugar de una estadounidense.

Al final, cuando viajamos, tendemos a encerrarnos en cajas metálicas rodando por las carreteras o volando por el cielo a velocidades tales que los choques suelen ser mortales. Estadísticamente, alguien tendrá que ser alcanzado por este tipo específico de precipicio de Séneca. Esto también forma parte de las reglas del universo.

COLAPSOS FINANCIEROS: BLOCKBUSTER QUIEBRA

Imagina que es el año 2008 y que eres el director general de Blockbuster: una gran empresa internacional especializada en el alquiler de películas. En su mejor momento, en 2004, Blockbuster empleaba a más de 80.000 personas, con casi 10.000 tiendas en todo el mundo y unos ingresos anuales de unos 6.000 millones de dólares. Pero en los años siguientes la empresa dejó de crecer. Como director general, te das cuenta de que hay problemas, pero también es cierto que Blockbuster sigue siendo el líder del mercado. Es cierto que tiene un competidor: un recién llegado llamado Netflix, que es agresivo y está creciendo. Incluso te han propuesto una fusión, pero ¿por qué deberías aceptar fusionarte con una empresa más pequeña? No hay razón para que Blockbuster haga grandes cambios, la actual desaceleración es solo un bajón temporal, seguramente, se puede remediar recortando los gastos y mejorando la eficiencia. Entonces, en 2009, Blockbuster pierde repentinamente más del 20% de sus ingresos. Un año después, la empresa está en quiebra y tú te quedas sin trabajo (figura 17).

FIG**URA 17**
EL COLAPSO DE BLOCKBUSTER Y EL ASCENSO DE NETFLIX



Fuente: Satell (2014).

¿Por qué Blockbuster se hundió tan rápido? Principalmente, porque la empresa fue cogida por sorpresa teniendo una estrategia de mar*keting qu*e se había quedado obsoleta. Greg Satell (2014) informa en For*bes:*

> *E*l modelo de Blockbuster tenía un punto débil que no estaba claro en ese momento. Ganaba una enorme cantidad de dinero cobrando a sus clientes tasas por retraso, que se habían convertido en una parte importante del modelo de ingresos de Blockbuster. La cruda realidad —y el talón de Aquiles de la empresa— era que los beneficios de la compañía dependían en gran medida de la penalización de sus clientes.

Netflix tenía un enfoque diferente: los pedidos se hacían por Internet, los abonos mensuales eran de tarifa plana y no había cargos por retraso. Después, Netflix fue pionero en ofrecer servicios de str*eaming online, B*lockbuster le siguió, pero demasiado tarde y con un plan menos eficaz.

Cuando las cosas empezaron a ir mal para Blockbuster, podemos imaginar el revuelo en la sede de la empresa. Seguro que hubo reuniones de los directivos intentando desesperadamente "hacer algo" para evitar el desastre. Y con la misma seguridad, se idearon muchas "soluciones" poniéndose algunas en práctica, pero ya era demasiado tarde: la dirección de Blockbuster fue cogida por sorpresa y el mecanismo mortal de potenciación de las retroalimentaciones se había puesto en marcha: cuanto más dinero perdía Blockbuster y la deuda se acumulaba, más difícil era proponer buenas ofertas a sus clientes. Y con los clientes abandonando Blockbuster se perdía más dinero y se acumulaba más deuda. Hasta el amargo final, en 2010.

Probablemente, Hemingway nunca oyó hablar del concepto de colapso de Séneca, pero lo describió perfectamente en su libro de 1926, Fie*sta:* "¿Cómo te has arruinado? —preguntó Bill—. De dos maneras —dijo Mike—, gradualmente y luego de repente".

La deuda, intrínsecamente, no tiene por qué ser algo malo: se puede argumentar que sin ella la sociedad no podría funcionar. David Graeber ha presentado una historia general de la deuda en su libro Deb*t, the first 5.000 years (2*011) en el que muestra que la deuda es la esencia misma del dinero, algo que ya había argumentado Mitchell Innes en 1914. Pero el problema de la deuda es que se acumula, a menudo más allá de la posibilidad práctica de devolverla. Entonces, la deuda se convierte en insolvencia y eso es malo. En todas las sociedades humanas, no poder mantener la propia promesa es una grave violación de la confianza, algo que puede destruir el propio tejido de una familia, una empresa o un Estado entero. La insolvencia monetaria no es más que una versión cuantificada del incumplimiento de una promesa.

En la Antigüedad, las personas que no podían pagar sus deudas se enfrentaban a duras leyes y costumbres que podríamos calificar de draconianas. Las primeras leyes romanas se basaban en el concepto de man*us iniectio (li*teralmente, 'mano puesta sobre él'), que podía significar que el deudor insolvente podía ser castigado físicamente, quizá muerto o reducido a la esclavitud. Un remanente de estas antiguas leyes se encuentra en El *mercader de Venecia, d*e Shakespeare, cuando el prestamista Shylock insiste en tomar una libra de carne del protagonista, Antonio, cuando este no puede pagar su deuda. Sin duda, un caso de colapso de Séneca para él.

Tan duras eran las penas por insolvencia que la mayoría de los códigos legales antiguos incluían también disposiciones de clemencia. Ya en la época sumeria, hace tres milenios, existía un uso llamado ama-*gi (o* ama*r-gi) (*Kramer, 1963), un término traducido como 'libertad' pero que literalmente significa 'vuelta a la madre', que implicaba el borrado periódico de todas las deudas. Los judíos tenían tradiciones similares con el she*mitah ('s*abático') y el jubileo (cada siete años sabáticos), en los que se anulaban diversas obligaciones, incluidas las deudas. Las limpiezas periódicas tenían la función de evitar la acumulación excesiva de deudas.

El jubileo era una buena idea, pero conllevaba un gran problema: cuando se acercaba el año de la limpieza, entonces nadie prestaba nada a nadie sabiendo que pronto se cancelaría su crédito. Esa fue probablemente la razón por la que el rabino Hillel el Viejo introdujo la regla del pr*ozbul dur*ante el siglo I a. C. Permitió la estipulación de contratos con una cláusula explícita que haría que la deuda fuera inmune a la eliminación periódica de la she*mitah.*

*O*tros tipos de legislación no implicaban la supresión de toda la deuda, sino que reducían las penas al deudor insolvente. Ya en la época imperial romana, el castigo por insolvencia se suavizó considerablemente en comparación con épocas anteriores. Durante la Edad Media en Europa, la pena por insolvencia podía limitarse a una humillación pública que se realizaba sobre una piedra especial llamada lap*is scandali (Ro*ma y el Arte, 2015) o 'piedra del escándalo'. El deudor era obligado a sentarse, desnudo, sobre la piedra mientras tenía que afirmar en voz alta que perdía todos sus bienes a favor del acreedor. Aquello resultaba humillante, sin duda, pero no tan malo como tener que dar una libra de la propia carne al acreedor. La idea de suavizar el castigo por insolvencia atraviesa muchas sociedades y culturas y, en el Corán, en la "Sura al-Baqarah" (S*u*ra de la vaca), podemos leer en el versículo 280: "Y si alguien está en apuros, entonces que se posponga hasta un momento de tranquilidad. Pero si das de tu derecho como caridad, entonces es mejor para ti, si solo lo supieras". En los tiempos modernos, la legislación sobre la quiebra es variada y depende de los sistemas legales específicos de los diferentes países. La idea general, de todos modos, es siempre la misma: suavizar el impacto de la insolvencia tanto para el deudor como para el acreedor.

Las leyes de quiebra actuales seguramente no son perfectas, pero son muy necesarias, ya que el colapso financiero es un acontecimiento muy común. Según Eric Wagner (2013), en For*bes, e*l 80% de las empresas emergentes fracasan en los primeros 18 meses. La quiebra se impone normalmente por orden judicial. El tribunal nombra a un administrador de la quiebra que liquida los activos de la empresa o persona insolvente y distribuye los beneficios entre los acreedores del deudor. De esta manera, la persona o empresa en quiebra pueden volver a empezar, al menos en teoría. En la práctica, no siempre es posible acabar con la deuda tan fácilmente. Por ejemplo, en Estados Unidos, puedes haber obtenido un préstamo federal para estudiantes sobre la base de la idea de que los tipos son bajos pero, aun así, te puede ocurrir que no puedas pagarlo. En un caso como este, puedes descubrir que la opción de la quiebra personal no es posible para ti, excepto en casos especiales. Te endeudas de por vida con unas condiciones que empiezan a parecerse a una forma de esclavitud (Brown, 2018). Mucho peor que tener que sentarse desnudo sobre una piedra durante un tiempo.

Incluso cuando funciona como está diseñada, la quiebra puede tener malas

consecuencias para todos los implicados. Las quiebras a pequeña escala pueden generar la ejecución de la vivienda, lo que supone un grave trauma que puede afectar a las personas durante el resto de su vida. Las deudas y la quiebra pueden provocar síntomas de TEPT (trastorno de estrés postraumático) que conduce a la depresión e incluso al suicidio (Rhode, 2013). Las quiebras a gran escala implican la pérdida de puestos de trabajo para miles de personas y, a muy gran escala, el resultado puede ser la inestabilidad política, las guerras civiles y otros desastres. Está claro que los colapsos financieros son un mal tipo de colapso de Séneca y, como primera aproximación, el problema se reduce a evitar quedar atrapado en uno. Hay poco que se pueda hacer si se vive en un país que se hunde en un gran colapso financiero: todo lo que se puede hacer es intentar sobrevivir lo mejor posible. Sin embargo, a menor escala, es posible tomar precauciones.

Hay muchas recetas que puedes encontrar en libros y sitios de Internet sobre cómo invertir tus ahorros de tal manera que se multipliquen por un gran factor y te hagan rico. Un increíble número de estas recetas son evidentes esquemas de Ponzi diseñados para desviar tu dinero. Solo como un ejemplo, entre muchos, puedo citar el esquema llamado Quantum Code (Bardi, 2017). En el momento en que estoy escribiendo este capítulo, a principios de 2019, el sitio web de la empresa Quantum Code todavía existe y puedes encontrarlo buscando en Google varias combinaciones de "Quantum Code", "financiero" e "inversión". El vídeo que utilizan para vender su plan está muy bien hecho y, una y otra vez, muestra todas las ventajas de ser rico: un avión personal, grandes coches, joyas, baratijas caras y más. El arte, al fin y al cabo, se basa sobre todo en algún tipo de proceso de creación; cuando vemos una obra de Shakespeare, no nos preocupamos de si Hamlet es un personaje histórico o no. En este caso, los actores que interpretan al supuesto magnate financiero, Michael Crawford, y a su asistente personal, Tasha, hacen un magnífico trabajo de interpretación.

Está claro que el esquema constituye una estafa desde la primera frase que se escucha en el vídeo: "Me llamo Michael Crawford, sí, ese tipo del que habrán leído en For*bes y* otras revistas financieras". Se tarda menos de un minuto en comprobar que no existe nadie con ese nombre mencionado en For*bes ni* en ninguna otra revista como magnate financiero ni nada parecido. Tal vez mucha gente por ahí es incapaz de utilizar los motores de búsqueda para

desacreditar este tipo de historias. Aun así, cualquiera debería desconfiar al escuchar a Michael Crawford decirles que quiere hacerlos millonarios a cambio de nada, por pura filantropía. ¿Acaso no tienen una abuela que les dijo que "nadie da duros a cuatro pesetas"? Entonces, ¿cómo puede alguien creer en esta estafa tan transparente?

Para todo lo que existe tiene que haber una razón de ser. El hecho de que el vídeo de Quantum Code sea tan fácilmente desacreditable no puede ser un error, debe ser una característica. La estafa es tan evidente que solo podemos imaginar que el guion del vídeo se pensó desde el principio como un cebo para bobos. Evidentemente, qui*eren bobos y s*e aseguran de que los que caen en la trampa lo sean. De hecho, se puede demostrar que el truco de preseleccionar a los "pringados" es la mejor estrategia para optimizar el esfuerzo del estafador. Podemos leer una discusión sobre este tema en un artículo de Herley (2012) (aquí, "ataque" se refiere a la decisión del estafador de comprometerse con el objetivo):

> Al final de muchos ataques se requiere un esfuerzo por objetivo. Así, cuando el coste es distinto de cero, cada objetivo potencial representa una decisión de inversión para un atacante. El atacante invierte su esfuerzo con la esperanza de obtener una recompensa, pero esta decisión nunca es impecable.

La idea general es que los estafadores tienden a preseleccionar objetivos lo suficientemente estúpidos como para caer en una forma de estafa evidente y que, por tanto, son víctimas casi seguras de la misma. Al fin y al cabo, no es nada diferente de la estrategia que suelen utilizar los leones y los leopardos cuando eligen a sus presas entre los débiles y entre los individuos aislados.

Por supuesto, cada persona necesita ser engañada de forma diferente. Un examen superficial de la World Wide Web muestra que existe todo un mercado de estafas financieras "clasificadas" para diferentes clientes. Un caso extremo de estafas obvias es el de la "estafa nigeriana", a veces conocida como la "estafa nigeriana 419", ya que la primera oleada de esta estafa vino de Nigeria y 419 viene de la sección del Código Penal de Nigeria que (en teoría) la prohíbe. Funciona así: la víctima recibe un mensaje en el que se cuenta una elaborada historia sobre grandes cantidades de dinero atrapadas en un banco durante acontecimientos como guerras civiles o golpes de Estado, o quizá debido a una herencia bloqueada por restricciones gubernamentales o impuestos. El estafador ofrecerá entonces a la víctima una gran suma de dinero para ayudarlo

a transferir ese dinero fuera del país.

No creo que haya que advertir a ninguno de los lectores de este libro para que no caiga en una estafa tan obvia como la del 419 nigeriano, pero, como he dicho, hay todo un zoo de estafas a varios niveles. El Código Quantum es uno fácilmente detectable, aunque es mucho más sofisticado que el nigeriano 419. Ascendiendo por la escala, encontramos esquemas teóricamente serios como los diversos tipos de "fondos de cobertura". La idea de estos fondos es utilizar técnicas sofisticadas de gestión del riesgo para diversificar las inversiones y reducir los riesgos para los inversores; hoy en día, los fondos de cobertura gestionan varios billones de dólares en todo el mundo. Sin embargo, es discutible que estos fondos puedan realmente proteger a los inversores de riesgos sistémicos como un colapso del mercado mundial, como ocurrió en 2008. Además, según Nassim Taleb (2007), los fondos de cobertura son vulnerables al colapso del "cisne negro", en este sentido tienen algún punto en común con la "estrategia de la martingala" en la ruleta: doblar la apuesta después de cada pérdida. Al igual que en el caso de la estrategia de la martingala en la ruleta, los fondos de cobertura solo pueden comerciar con los riesgos: pueden reducir la frecuencia de las pequeñas pérdidas a cambio de una baja frecuencia, pero no imposible, de grandes pérdidas.

Un buen ejemplo, aquí, es el caso de Amaranth Advisors. Podemos leer en Investopedia que:

> Después de captar activos por valor de 9.000 millones de dólares bajo gestión, la estrategia de negociación de energía del fondo de cobertura fracasó al perder más de 6.000 millones de dólares en futuros de gas natural en 2006. Ante unos modelos de riesgo defectuosos y la debilidad de los precios del gas natural, debido a unas condiciones invernales suaves y una temporada de huracanes floja, los precios del gas no repuntaron al nivel necesario para generar beneficios para la empresa, y se perdieron 5.000 millones de dólares en una sola semana. Tras una intensa investigación de la Commodity Futures Trading Commission, Amaranth fue acusada de intento de manipulación de los precios de los futuros del gas natural (McWhinney, 2011).

En este campo, todos tenemos que tener mucho cuidado porque ninguno de nosotros es inmune a la trampa de Dunning-Kruger (1999). Se trata de un síndrome que hace que la gente se crea más inteligente y con más conocimientos de los que realmente tiene. Y no importa lo inteligente que seas, probablemente, haya una estafa exactamente hecha a tu medida, en algún lugar. Podría contar historias sobre mi propia experiencia, aunque,

afortunadamente, nunca tuve grandes pérdidas financieras, eso sí, caí en trucos tan obvios y me odiaba a mí mismo por haber sido tan ingenuo de haberlo hecho. Pero así es la vida, dicen que nace un tonto cada minuto y cada uno de nosotros puede ser un tonto en algunas circunstancias.

Hay un caso más del esquema financiero de Ponzi que vale la pena señalar aquí: las "estafas tecnológicas", un campo en el que puedo afirmar que tengo cierto grado de experiencia debido a mi trabajo como investigador científico. Este tipo de estafas se basa en la idea difusa de que la tecnología puede producir milagros. Esto, a su vez, se basa en el hecho de que durante el siglo XX vimos el desarrollo de nuevas tecnologías que podrían calificarse de casi milagrosas: pensemos en los antibióticos, la energía nuclear, los dispositivos electrónicos y mucho más. Pero eso no significa que los milagros tecnológicos puedan obtenerse a voluntad. Sigue siendo válida la regla básica que dice que el progreso se basa en "un 1% de inspiración y un 99% de transpiración". Los profesionales de la innovación lo saben, pero la gente de a pie a menudo no y su ingenua fe en la tecnología avanzada puede convertirlos en víctimas fáciles de las estafas tecnológicas.

Existen muchas personas y empresas que afirman poseer tecnologías maravillosas capaces de resolver tal o cual problema mundial. Algunas de estas ideas son serias, propuestas por personas serias, que merecen atención para los futuros desarrollos. Pero muchos son exagerados y, en no pocos casos, son auténticas estafas. La fauna en este ámbito es muy variada, desde el científico loco solitario hasta los esfuerzos bienintencionados, pero equivocados, destinados a fracasar dada la realidad de la física o del mercado.

En la categoría de los "científicos locos", sin duda, hay que mencionar al inventor italiano Andrea Rossi, conocido por su catalizador de energía o E-Cat, un dispositivo que supuestamente produce energía mediante la fusión nuclear del hidrógeno (o quizás de algún otro elemento o, quizás, de ninguno) (Bardi, 2012). Sin duda, Rossi tiene una cierta habilidad para promocionarse a sí mismo y a sus ideas. Consiguió vender su E-Cat al Departamento de Física de la Universidad de Bolonia (E-Cat Word, 2012) provocando que los miembros de esta antigua y respetada institución sufrieran una considerable pérdida de prestigio. Utilizando su asociación con la universidad como certificado de seriedad, el invento de Rossi recorrió la Red como un meteoro brillante que durante un tiempo llegó a estar presente incluso en los principales medios de comunicación. Hoy (2019) el E-Cat parece haber perdido interés y se ha

desvanecido, aunque el señor Rossi sigue siendo activo en su promoción.

El esquema de Rossi es un ejemplo típico de muchos similares que he visto a lo largo de mi carrera. Funciona así: alguien se presenta en la puerta de un departamento de una universidad o de una institución de investigación. Esta persona propone una cuantiosa subvención a los investigadores para probar y mejorar el maravilloso proceso que él o su empresa están desarrollando. Si la universidad o el instituto aceptan la subvención, el dinero en cuestión puede pagarse o no, pero el inventor o los inventores utilizarán la subvención para afirmar que la idea ha sido validada por la universidad o el instituto de investigación. Rossi prometió un millón de euros a la Universidad de Bolonia, que nunca pagó; se dice que intentó hacer el mismo truco con la NASA (Krivit, 2012). A mí me ocurrió algo parecido. Hace años, alguien pidió a la Universidad de Florencia que probara un nuevo método para producir silicio ultrapuro que su empresa había estado desarrollando. Parecía una propuesta seria y la física era sólida. Así que aceptamos la subvención y dos investigadores de mi grupo trabajaron en el tema durante un año. Comprobamos que el proceso funcionaba, al menos a escala de laboratorio, y que seguramente merecía más esfuerzos para ser desarrollado a nivel industrial. Pero pronto descubrimos que los proponentes no tenían ninguna intención de explotar el nuevo proceso, solo querían dinero del Gobierno y de algunos grandes inversores, y ni siquiera querían pagarnos. Afortunadamente, la oficina jurídica de mi universidad pudo obligarlos a desembolsar la mayor parte del dinero que habían prometido en el contrato. Después de esto, no volvimos a saber de ellos.

Estas historias ilustran lo difícil que es invertir en planes tecnológicos: algunos son estafas, muchos son simplemente malas ideas, e incluso una buena idea puede convertirse en una estafa si los que la promueven son tiburones financieros. Como Georges Pompidou dijo, hay tres maneras de arruinarse: la más agradable es con las mujeres, el juego es la más rápida y la alta tecnología es la más segura.

Volviendo al problema de la quiebra, está claro que la insolvencia es uno de esos elementos de nuestra sociedad que nos gustaría ignorar pero que puede afectarnos gravemente en cualquier momento de nuestra vida. Pero ¿qué es realmente la insolvencia? y ¿por qué existe? En la economía estándar, la quiebra se trata en las dos ramas principales del campo, la microeconomía que estudia el comportamiento de los individuos y las empresas a la hora de tomar

decisiones sobre la asignación de recursos y la estructuración de la producción y otras características, y la macroeconomía, que adopta una visión más amplia, estudiando la economía en su conjunto, en particular en lo que se refiere al efecto de las decisiones políticas de los Gobiernos.

La microeconomía utiliza una variedad de modelos destinados a encontrar los valores óptimos de los parámetros de una empresa o de un proceso. También puede asumir un aspecto cualitativo cuando examina qué decisiones toman los directivos para dirigir sus empresas a través de las procelosas aguas de esa entidad que llamamos "el mercado". Es el mismo reto al que se enfrentan los individuos y las familias que intentan navegar en un mundo difícil: pagar la hipoteca de la casa, alimentar a los niños, reparar el coche, todo eso. La quiebra puede producirse porque alguien tome una decisión equivocada, como en el caso de Blockbuster, por no seguir la evolución del mercado. O puede ocurrir porque algo cambia de repente, por ejemplo, uno pierde su trabajo y no puede encontrar uno nuevo. En general, la microeconomía nos ofrece muchos ejemplos de los que aprender, pero no una teoría general de por qué se hunden las entidades económicas.

La macroeconomía, en cambio, pretende entender cómo funciona el sistema económico y eso incluye también a los colapsos financieros, que obviamente forman parte del sistema. En este sentido, Hyman Minsky (1992) desarrolló la "hipótesis de la inestabilidad financiera" a partir de la década de los setenta. Creo que la idea de Minsky puede resumirse como "el éxito engendra excesos". Es decir, durante los periodos de crecimiento económico, la gente tiende a ser excesivamente optimista, se endeuda mucho con los bancos y se encuentra en una espiral de deuda que pronto se sale de control. Entonces, los inversores quieren que se les devuelva el dinero y eso genera una cascada de retroalimentación que se refuerza y hace que toda la empresa se derrumbe en un clásico precipicio de Séneca. Se parece mucho a la historia de la ameba Amelia que vimos anteriormente: una población biológica que crece exponencialmente hasta que se derrumba cuando se acaba la comida. En el caso de una empresa, el dinero desempeña el papel de "alimento" y el crecimiento incontrolado hace que la empresa se quede sin el alimento que necesita.

En definitiva, todo el problema de los colapsos financieros es el resultado de la existencia del dinero. Pero ¿qué es exactamente el dinero? Sin entrar en las diversas teorías sobre el dinero que los economistas siguen discutiendo,

podemos decir que, en su día, el dinero era algo en lo que todo el mundo estaba de acuerdo: un peso de metales preciosos. Al fin y al cabo, la moneda británica todavía se define en unidades de peso, aunque una libra (en términos monetarios) no pesa una libra (en términos físicos). Hasta no hace mucho tiempo, el dinero era simplemente una ficha que representaba una entidad física: un determinado peso de oro o plata. Pero las cosas cambiaron mucho con el tiempo y, con el siglo XX, la convertibilidad del dólar en metales preciosos se hizo más teórica que real. En 1971, el presidente Nixon la anuló formalmente. Desde entonces, el dinero ha sido una entidad puramente virtual, creada por los bancos centrales de la nada. Si se piensa en ello, resulta un poco extraño que la gente acepte que se le pague por su trabajo con algo que no existe. Pero eso no cambia el hecho de que el dinero es la espina dorsal de la sociedad: se intercambia, se presta, se pide prestado, se distribuye, se gasta y mucho más. Y, con el dinero, viene la deuda. Con la deuda, llega la insolvencia y con ella, la quiebra y todos los desastres asociados.

¿Podríamos pensar en ir un paso más allá de la institución de las leyes de quiebra e imaginar un sistema financiero en el que la gente no pudiera quebrar? Esta es una idea que flota hoy en día en la conciencia global del mundo. Quizá la primera propuesta en este sentido la hizo Cory Doctorow en 2003 (durante la era pre-Facebook) en su novela Dow*n and Out in the Magic Kingdom, d*onde proponía una especie de "dinero por méritos", llamado "Whuffie", que la gente podía acumular por las buenas acciones que realizara. Este dinero era una forma de crédito, pero no se podía gastar: solo producía prebendas y ventajas para su propietario. Era algo que prefiguraba la "puntuación de crédito" que Facebook y otras redes sociales desarrollarían más tarde. Quizá Doctorow se inspiró en el relato de Mark Twain El *billete de un millón de libras (19*03), en el que el protagonista descubre que la mera posesión de este billete de enorme valor le da derecho a honores y bienes sin necesidad de gastarlo. Pero puede que Doctorow estuviera pensando en el concepto del honor personal, de moda en tiempos menos monetizados que los nuestros. Como hombre honorable tenía derecho a privilegios, pero disfrutar de ellos no significaba que su honor se viera reducido.

Más tarde, la idea de utilizar la puntuación de crédito de las redes sociales como una forma de dinero fue propuesta, quizás por primera vez, por Solitaire Townsend en 2013. El Gobierno chino parece haberse tomado en serio esta

idea con su plan de implantar un sistema estatal de crédito social (shè*huì xìnyòng tǐxì) q*ue "calificaría" a todos los ciudadanos chinos con una puntuación basada en los méritos. Obtienes puntos positivos por ser un buen ciudadano: ayudar a una anciana a cruzar la calle te reportará puntos de la señora y de las personas que hayan presenciado el acto. Obtienes puntos negativos cuando haces algo malo, como recibir una multa de tráfico o simplemente un mal informe de alguien que se sintió herido por algo que hiciste. El sistema de crédito social chino puede considerarse una forma de dinero en el sentido de que se basa en la oposición del yin y el yang de la deuda y el crédito. Para un ciudadano chino, tener una puntuación de crédito social suficientemente alta es un requisito previo para poder comprar ciertas cosas que en Occidente solo son posibles para los ricos, billetes de avión, por ejemplo. Algo similar se había desarrollado en tiempos anteriores en la Unión Soviética, donde se consideraba que los miembros del Partido Comunista Soviético tenían una puntuación de crédito más alta que los demás. Disfrutaban de prebendas y servicios no monetarios al formar parte del sistema de la no*menklatura, n*o tan diferente de lo que llamamos el est*ablishment en* Occidente.

Una "moneda de reputación" podría funcionar, al menos, en cierto modo. Podría ser una ventaja de un sistema así el que pueda estar amañado de tal manera que no cree ningún crédito negativo (ninguna deuda). ¿Podríamos eliminar así las malas consecuencias de la insolvencia? Y de un plumazo, eliminaríamos cosas como el hurto, el robo, la corrupción, las estafas y todos los delitos relacionados con el dinero. ¡Nunca nadie podría robar tu calificación crediticia a punta de pistola! Sin embargo, obviamente, hay problemas con la idea. Doctorow (2013) dice sobre su creación, el dinero Whuffie:

> Whuffie tiene todos los problemas del dinero, y luego un montón más que le son exclusivos. En Dow*n and Out in the Magic Kingdom, v*emos que Whuffie —a pesar de sus pretensiones de ser "meritocrático"— acaba mezclándose con imbéciles sociópatas que saben cómo halagar, engatusar o aterrorizar para llegar a la cima. Una vez que tienes mucho Whuffie —una vez que mucha gente te considera reputado—, otras personas se inclinan para darte oportunidades de hacer cosas que te hacen aún más reputado, colocándote en una posición en la que puedes dar discursos, liderar, cerrar con broche de oro y, en general, atribuirte el mérito de todo lo que va bien, mientras culpas de todas las meteduras de pata a los mortales menores.

La reputación puede ser una terrible forma de moneda para aquellos que se encuentran en el extremo equivocado de la escala. ¿Te han acosado alguna vez en tu adolescencia? Si lo has experimentado, sabes lo duro que puede resultar ser el chico del peldaño más bajo de la escala. Se sabe que es una causa de suicidio entre los adolescentes de los países occidentales (Bullying Statistics, 2017). La única forma de escapar es comportarse de la forma más abyecta con los líderes del grupo: adulándolos y obedeciendo sus órdenes.

Existe al menos otro caso de sistema monetario no monetario: la investigación científica. Los científicos se califican a sí mismos con diversos factores de puntuación basados en la popularidad de su trabajo entre otros científicos, medidos de diversas formas arcanas, siendo la más popular en la actualidad el llamado "factor h". Si eres un joven científico, tu carrera depende de tu puntuación y eso te empuja al conformismo. No puedes permitirte criticar a tus colegas más veteranos ni proponer ideas o teorías que estén fuera de la sabiduría comúnmente aceptada en tu campo. Ese es un privilegio que solo te ganarás cuando consigas la titularidad e incluso entonces tendrás que tener cuidado de no complacer a los poderosos que controlan la financiación de la investigación.

Las calificaciones científicas nunca son negativas y, por muy bajo que sea el crédito de los científicos de alto nivel, es raro que les caiga el equivalente a una sentencia de quiebra. Esta es probablemente la razón por la que se suele decir que "la ciencia progresa de un entierro a otro" (una cita atribuida al científico alemán Max Planck). Significa que los viejos científicos tienden a bloquear el progreso científico hasta que el fenómeno natural del colapso biológico los elimina del sistema. Sería una reforma interesante introducir "puntos negativos" en la ciencia y despedir a los científicos que publican uno o más artículos verdaderamente malos. Pero antes de que eso ocurra, la "trampa de Whuffie" que describió Doctorow haría su papel para empujar a los científicos hacia el conformismo más abyecto. Eso seguramente destruiría esa chispa de creatividad que, a pesar de todo, la ciencia ha logrado mantener hasta ahora.

Llegados a este punto, podemos ver que la quiebra no es un error, sino una característica del sistema. Es uno de los controles que tiene el sistema para mantener el vínculo entre la entidad virtual que es el dinero y las entidades físicas que son los bienes que se pueden comprar. Al igual que la inflación, la quiebra es una herramienta evolutiva que evita que el sistema se quede atascado en una situación sin salida, eliminando las entidades ineficaces y

obsoletas que lo pueblan. Si no fuera por la bancarrota, probablemente, seguiríamos teniendo a Blockbuster alquilando CD de vídeo y cobrándote si te retrasas en devolverlos. Al final, el dinero puede ser una entidad virtual y también podemos definirlo como el estiércol del diablo. Pero somos adictos a él y seguimos jugando al juego del dinero. El dinero está tan profundamente entrelazado con el funcionamiento de nuestra sociedad que ni siquiera podemos imaginar cómo podría funcionar sin él. ¿Qué podría pasarnos si un gran colapso financiero destruyera el valor de nuestro poderoso dólar? No podemos asegurarlo, pero el poderoso "imperio globalizado" podría desmoronarse como un castillo de naipes en un único y enorme colapso de Séneca.

CATÁSTROFES NATURALES: LA GRAN INUNDACIÓN DE FLORENCIA

No hace mucho, acompañaba a mi hija que buscaba un apartamento en Florencia. Como en su familia tienen tres gatos, necesitaba un pequeño jardín y estábamos visitando principalmente apartamentos en planta baja. Estos lugares siempre corren el riesgo de inundarse y yo utilizaba una aplicación de GPS en mi teléfono móvil para medir la altura del piso sobre el nivel del mar. Los empleados de la inmobiliaria que nos acompañaban se sorprendían a menudo y me preguntaban qué estaba haciendo. Ante mis explicaciones, se quedaban perplejos: ¿inundaciones? ¿En Florencia? ¡Eso no puede ocurrir!

Estos hombres y mujeres jóvenes, por lo general en la treintena, no tenían ningún recuerdo personal de la gran inundación que asoló Florencia en 1966. Sabían que había ocurrido, sí, pero lo clasificaban como parte de la historia antigua: las invasiones bárbaras, la peste negra, las cruzadas y otros acontecimientos similares que tuvieron lugar en un pasado remoto y que no se repetirían. Una inundación que había ocurrido medio siglo antes no tenía relevancia en su planificación diaria.

Las catástrofes naturales se caracterizan por producirse a intervalos lo suficientemente largos como para que la gente se olvide de que pueden producirse y se producen. Las inundaciones son uno de esos sucesos, y la de 1966 en Florencia probablemente ya ha superado la línea del olvido. Pero fue un acontecimiento importante: no es el único caso de una gran inundación que afecta a una ciudad moderna, pero sí uno que amenazó con destruir los tesoros

de arte que se conservan en Florencia desde el Renacimiento. La inundación afectó a muchos edificios antiguos y dañó preciosas obras de arte, generando una gran preocupación en todo el mundo. Afortunadamente, el número de víctimas fue relativamente pequeño.

Cuando tenía 14 años, fui testigo de la inundación de 1966. Fue una de esas experiencias que marcan la vida de uno, aunque mi casa estaba en un terreno relativamente alto y las aguas no llegaron, la oficina de mi padre estaba en el centro, en la planta baja, y se vio invadida por las aguas turbias que la llenaron casi hasta el techo. Afortunadamente, no había nadie cuando llegó la inundación, pero era el lugar donde guardaba la mayoría de mis libros; muchos se convirtieron en montones de papel pastoso y aún recuerdo perfectamente el olor a gasolina o queroseno que desprendían. Algunos pudieron ser restaurados y aún conservo algunos en mis estanterías.

La inundación dejó una ciudad en completo desorden. Ya no funcionaba nada: los comercios se habían inundado, los bancos estaban cerrados, el sistema de alcantarillado estaba obstruido por los escombros, no había agua en los edificios, no había transporte público, los coches de la gente estaban empapados de barro y no arrancaban, muchos hogares se quedaron sin energía eléctrica. Y el Gobierno italiano, a quien pilló por sorpresa, tardó en prestar ayuda.

En los días siguientes, los florentinos se "arremangaron" y se pusieron a trabajar. Para los que lo vivieron, se produjo una increíble oleada de espíritu comunitario y de ayuda recíproca. El barro maloliente se paleó y comenzó el lento trabajo de limpieza y vuelta a la actividad. Eso también implicó ocuparse de los museos inundados y de los edificios antiguos con sus tesoros de arte. Pronto, el esfuerzo de limpieza dejó de ser solo un trabajo para los ciudadanos de Florencia: vinieron personas de todo el mundo a ayudar. Se les llamaba los "ángeles del barro" y algunos de ellos quedaron tan prendados de la vibrante atmósfera del esfuerzo de reconstrucción que nunca se marcharon. Se casaron con florentinos y muchos de ellos siguen allí, envejeciendo en Florencia y cuidando de sus hijos y nietos, ahora también florentinos.

La historia de la inundación de Florencia tuvo un final feliz: los daños fueron limitados y la ciudad pudo volver a sus condiciones originales. No siempre esto es así: las catástrofes naturales son de muchos tipos y pueden causar daños mucho peores, así como terribles pérdidas de vidas humanas. Las inundaciones, los huracanes, los incendios forestales, los terremotos y otras

manifestaciones de la fuerza de la naturaleza son sucesos poco frecuentes, pero también lo suficientemente comunes como para que cada uno de nosotros experimente uno o varios de ellos a lo largo de nuestra vida. A menudo, aunque no siempre, la distribución de las catástrofes naturales tiende a seguir la ley de Pareto, como ya comentamos anteriormente. Es decir, tienden a comportarse según una fórmula matemática en la que la frecuencia de un desastre es proporcional a su tamaño elevado a un exponente (ley potencial). Las catástrofes tienden a ser menos probables cuanto más grandes son, pero existe una probabilidad no nula de que se produzcan incluso eventos extremadamente grandes.

En la práctica, a partir de los datos históricos, se puede decir que una determinada catástrofe tiene una probabilidad específica de ocurrir en tu región, pero eso no te dice cuándo y dónde tendrá lugar exactamente. Imaginemos que la probabilidad de, por ejemplo, un terremoto de cierta magnitud es del 1% cada año en el lugar donde vives. Eso significa que hay un 63% de probabilidades de que el terremoto se produzca en un siglo. Pero puede ocurrir mañana por la mañana, o después de 99 años, o nunca en los próximos 100 años. Es casi seguro (más del 99,9% de probabilidades) que se produzca dentro de los próximos 1.000 años, pero eso te ayuda poco a planificar esta posibilidad. Así que hay que planificar teniendo en cuenta la peor hipótesis, lo que puede ser una buena idea en general.

Existe toda una taxonomía de fenómenos naturales raros que pueden causar grandes daños a la población. Podemos empezar con los terremotos. Los que destruyen edificios son raros, pero cuando se producen grandes terremotos, las consecuencias suelen ser desastrosas. El más fuerte jamás registrado fue el gran terremoto de Chile, que ocurrió el 22 de mayo de 1960, cerca de Valdivia, en el sur del país. Su magnitud se midió en 9,5 en la escala de Richter. Se trata de un valor enorme: la escala es logarítmica, de modo que, en términos de energía, cada incremento de un número entero corresponde a un aumento de aproximadamente 31,6 veces la cantidad de energía liberada. El terremoto de Valdivia causó muchos daños pero, afortunadamente, pocas víctimas, porque fue precedido por una poderosa sacudida que hizo que mucha gente abandonara sus casas antes de que llegara la sacudida principal.

Hay muchos más ejemplos de terremotos destructivos, todo el mundo conoce la falla de San Andrés, que marca las dos placas que forman California, que se deslizan lentamente la una contra la otra teniendo choques irregulares.

El desastroso terremoto de San Francisco de 1906 es un recordatorio de lo peligroso que puede ser vivir en California, pero hubo muchos más terremotos en la zona. A veces, se dice que California está esperando "el grande", un terremoto tan potente que todo lo que está al oeste de la falla de San Andrés se deslizaría hacia el océano Pacífico (o, alternativamente, que todo lo que está al este de la falla de San Andrés se deslizaría hacia el océano Atlántico). Esto constituye sobre todo folklore y propaganda de los medios de comunicación: es cierto que se producen terremotos en California y que seguirán produciéndose a medida que las dos placas continentales sigan moviéndose, pero no hay pruebas de que se esté gestando un evento gigantesco, mucho más grande que todo lo que se ha visto antes, y que algún día convierta a San Francisco o a Los Ángeles en una categoría de parque de atracciones para ser visitadas por turistas con equipo de buceo.

California es solo un sector del gran "anillo de fuego", una región geológicamente activa que rodea el océano Pacífico. Japón, situado frente a California al otro lado del océano, forma parte del anillo y es otra zona propensa a los terremotos además de muy poblada. El gran anillo es solo una de las muchas áreas geológicamente activas del planeta: las que están en riesgo también incluyen las regiones del Mediterráneo, Oriente Medio, Asia Central y la del Himalaya, entre otras. Una región especialmente activa es el Gran Valle del Rift, que va desde Oriente Medio hasta África Central. En la frontera entre Somalia y Etiopía está en acción un proceso geológico para dividir la placa africana en dos nuevas placas separadas. Lo que ahora es un valle de poca altura será un nuevo mar, quizá parte de un océano, pero eso tardará millones de años.

No hay ningún lugar en todo el planeta del que se pueda decir que está completamente libre de terremotos, pero algunos lugares son seguramente más tranquilos que otros. De una manera habitual, es poco probable que experimentes terremotos importantes si vives en las zonas centrales de Norteamérica, en Australia o en Eurasia, pero ten en cuenta que un terremoto de tamaño medio sacudió Chicago en 1968. En general, el peligro de los terremotos no es tan grande como para alejarse de las zonas sísmicas, pero seguro que no puedes ignorarlo si vives en una. En cualquier caso, es una buena práctica tomar precauciones, vivir en una casa sólida —si se puede— y guardar el equipo de emergencia que se necesitará después del terremoto para hacer frente a la interrupción de servicios, como la obtención de comida, la

electricidad, el agua potable, etc.

Un fenómeno directamente relacionado con los terremotos es el tsunami, que tiene lugar siempre que un terremoto sacude el fondo marino. Eso puede perturbar una gran masa de agua que luego se desplaza por el océano. Cuando esta agua llega cerca de una costa, toma la forma de una ola, a veces muy grande, que se estrella contra la costa y puede destruir todo, incluso a lo largo de kilómetros tierra adentro. Las regiones más propensas a los tsunamis en el mundo son probablemente las de las costas del océano Pacífico, a lo largo del gran anillo de fuego, el último gran tsunami en esta región estuvo asociado al terremoto de Tōh*oku qu*e golpeó Japón en 2011. El océano Índico también es una región propensa a los tsunamis, basta recordar el tsunami de 2004 que azotó Indonesia y provocó la muerte de 230.000 personas. La región del Mediterráneo es geológicamente activa y también está sujeta a tsunamis; uno relativamente reciente sacudió las ciudades italianas de Messina y Reggio en 1908, causando un gran número de víctimas. Mucho antes, hace unos 3.600 años, se produjo una gran erupción volcánica en la isla de Thera (hoy llamada Santorini), en el sur del mar Egeo. El subsiguiente tsunami pudo haber destruido la civilización minoica y generado la leyenda del hundimiento de la Atlántida. El océano Atlántico es menos activo que otros océanos en cuanto al movimiento de las placas tectónicas, pero no obstante es sensible a los tsunamis provocados por los desprendimientos costeros. El origen de un posible tsunami atlántico en el futuro podría ser el colapso de una gran sección de la isla de La Palma, una de las islas canarias en el Atlántico oriental. Podría ocurrir como resultado de una erupción del volcán Cumbre Vieja. Según algunas estimaciones, si se produjera este desprendimiento, el resultado sería un muro de agua de hasta 300 pies de altura que se desplazaría por el Atlántico y llegaría a la costa este de Estados Unidos en unas nueve horas (Tehranirad et *al.*, 2015). Los daños resultantes en las ciudades costeras serían inimaginables, un verdadero supercolapso Séneca. Pero no tenemos ni idea de si tal desastre podría tener lugar ni cuándo.

Si vives en una zona geológicamente activa, también debes preocuparte por los volcanes, probablemente el fenómeno más destructivo generado por fuerzas puramente geológicas. Un ejemplo muy conocido es la destrucción de las ciudades de Pompeya y Herculano en el sur de Italia en la época romana, en el año 79 de nuestra era. Estas ciudades quedaron sepultadas bajo una gruesa

capa de cenizas, las excavaciones continúan hoy en día y los arqueólogos siguen encontrando rastros de los cuerpos de las personas que se asfixiaron o murieron por el calor, a veces todavía en la posición que tenían cuando murieron.

Un caso aún más espectacular de catástrofe volcánica es el del Toba, un "supervolcán" que entró en erupción hace unos 75.000 años en el lugar del actual lago Toba, en Sumatra (Indonesia). Fue quizá la mayor erupción conocida en una época en la que nuestros antepasados humanos tuvieron la oportunidad de experimentar sus efectos. Algunas pruebas indican que la enorme masa de polvo empujada a la atmósfera generó un "invierno volcánico" que pudo haber provocado la desaparición de una gran fracción de la población humana de la época. Eso dio lugar a la "teoría del cuello de botella genético" propuesta por varios científicos (Rampino, 1993) que explicaría por qué los humanos de hoy tienen una diferenciación genética relativamente pequeña. Puede ser porque todos somos descendientes del pequeño grupo de personas que sobrevivieron a la erupción de Toba y que luego se extendieron por todo el planeta en un interesante caso de "rebote de Séneca". Sin embargo, por muy fascinante que sea la teoría del cuello de botella, actualmente, parece que los datos no la apoyan (Lane, Chorn y Johnson, 2013). Sea como fuere, si hoy en día se produjera una erupción del tamaño de la de Toba, probablemente destruiría toda nuestra civilización, y tal vez incluso provocaría la extinción de la especie humana. Solo podemos esperar que la "cola gruesa" de la distribución de Pareto para las erupciones volcánicas no sea tan gruesa como para dar una probabilidad significativa a tal evento.

La erupción del supervolcán Toba está relacionada con la actividad de las placas tectónicas (Koulakov et *al.*, 2016), al igual que la mayoría de los volcanes activos en la actualidad. Pero también existe otro tipo de volcán, relacionado con los "puntos calientes" de la corteza terrestre (Kious y Tilling, 1994). Estos volcanes son generados por columnas de magma caliente que se inician en la astenosfera, la región del manto terrestre que se encuentra justo debajo de la corteza. Estas columnas se parecen un poco a los remolinos y burbujas que se producen en una lámpara de lava, aunque se mueven a una velocidad enormemente menor. El flujo de lava generada por un punto caliente suele ser más suave y se mueve más lentamente que el generado por las placas, los volcanes "normales", porque el magma es basáltico (o "máfico",

según la jerga de los geólogos) y contiene menores cantidades de gases disueltos que los volcanes "félsicos" (de nuevo, la jerga de los geólogos). Por tanto, la salida de lava basáltica está menos sujeta a estallidos explosivos.

Un volcán de punto caliente bien conocido es el que generó el archipiélago de Hawái en los últimos 5 o 6 millones de años, creándose una isla a la vez, a medida que el fondo del océano se movía sobre el punto caliente (que también pudo haberse movido). Hoy en día, se puede ver el punto caliente en acción en Kilauea, en el lado sureste de las islas de Hawái. El último estallido de erupciones tuvo lugar en 2018, que destruyó varias casas y provocó un terremoto, si bien no se registraron víctimas. El volcán Lōi*hi, e*n la costa sureste de Hawái, es la última encarnación del punto caliente subterráneo. Actualmente, se encuentra bajo el mar, pero crece y se eleva gradualmente. Se espera que comience a emerger sobre el nivel del mar dentro de unos 10.000 a 100.000 años. Seguramente, será algo espectacular de ver para aquellos de nuestros descendientes que tengan la oportunidad de estar allí.

El volcán del punto caliente de Yellowstone también merece una mención (Lowenstern, Smith y Hill, 2006). En este momento está tranquilo, ni siquiera es un volcán. Pero en los últimos 18 millones de años, aproximadamente, el punto caliente ha generado una sucesión de violentas erupciones e inundaciones de lava basáltica; al menos una docena de ellas fueron tan masivas que se clasifican como "supererupciones". El punto caliente podría volver a activarse y generar un nuevo supervolcán que podría rivalizar con el antiguo Toba, en términos de destrucción global, o incluso ser mucho peor. Se trata de otro registro en la lista de eventos que podrían destruir la civilización humana e incluso causar la extinción de la especie humana. Pero no podemos predecir cuándo (y si) tendrá lugar.

Este repaso a las catástrofes naturales gigantes no puede dejar de lado la posibilidad de los meteoritos, a menudo llamados "asteroides" cuando son de gran tamaño. Los meteoritos que caen sobre la Tierra pueden causar enormes daños, tanto, que son un tema popular de las películas catastróficas. Es cierto que el registro geológico muestra varios casos de grandes meteoritos que cayeron sobre la superficie de la Tierra. Uno especialmente espectacular fue el del meteorito de Chicxulub que impactó en la península de Yucatán, México, hace unos 66 millones de años. Se suele decir que el impacto causó la extinción masiva que incluyó la desaparición de los dinosaurios no avianos en

el límite entre el Cretácico y el Paleógeno (límite K-Pg). Esta idea había sido aceptada casi universalmente hasta hace una década, pero ahora es debatida y a menudo rechazada: parece claro que los dinosaurios fueron destruidos por un fenómeno diferente, una gigantesca erupción basáltica que tuvo lugar en la región que hoy llamamos el Decán, en la India (Archibald, 2014). En cualquier caso, el riesgo asociado a la caída de meteoritos es extremadamente bajo y no hay informes fiables de que nadie haya muerto por uno en tiempos modernos.

Las catástrofes relacionadas con la geología suelen clasificarse como "actos de Dios", es decir, que no tienen ninguna relación con la acción humana, pero no siempre es así. La influencia humana en el sistema terrestre es ya tan grande que afecta incluso a los fenómenos geológicos. Por ejemplo, el lento deshielo de los glaciares provocado por el calentamiento global, resultado en gran medida de las actividades humanas, está generando un fenómeno llamado "rebote isostático" de las regiones cubiertas por casquetes polares. Funciona así: la placa tectónica situada debajo del glaciar "flota" sobre la astenosfera fluida, por debajo de la corteza, como todas las placas tectónicas. El peso de la capa de hielo sobre ella empuja la placa hacia abajo pero al adelgazar la capa, esta se mueve hacia arriba. Es un fenómeno muy lento, pero desestabiliza toda la zona y puede generar terremotos, volcanes y, a veces, tsunamis.

Muchos otros fenómenos naturales son solo parcialmente naturales: pueden desencadenarlos la actividad humana y los daños que generan pueden verse incrementados por prácticas humanas imprudentes. Entre ellos, podemos citar los incendios forestales y los huracanes, a menudo potenciados por el calentamiento global. Una atmósfera más caliente puede hacer que los huracanes sean más destructivos, y también puede hacer que los incendios forestales sean más frecuentes y más mortales, tanto por el aumento de las temperaturas como por las sequías. En los últimos tiempos, California se ha visto afectada por varios grandes incendios: se trata de fenómenos naturales, pero las actividades humanas pueden aumentar su frecuencia e intensidad de varias maneras. Uno de ellos es la modificación de los patrones meteorológicos provocada por el cambio climático y otros son las malas prácticas de gestión forestal. La "tormenta de fuego de Oakland" de 1991 es un ejemplo: el incendio se vio potenciado por la introducción de árboles no autóctonos en California, los eucaliptos, fácilmente inflamables (Kirp, 2002).

Los corrimientos de tierra también son provocados por las actividades

humanas en términos de deforestación o de mala gestión del suelo. Un buen ejemplo es el que asoló la ciudad de Sarno, en Italia, en 1998, causando la muerte de 160 personas, engullidas por una gigantesca masa de deslizamiento que bajaba de las montañas circundantes. Se vio potenciado por la deforestación de las colinas que rodean la ciudad. En algunos casos, los corrimientos de tierra son de origen totalmente humano: por ejemplo, en 1966, el derrumbe de un montón de escombros de una mina de carbón en Aberfan, en Inglaterra, mató a 116 niños y 28 adultos en una escuela que se había levantado en las cercanías.

¿Se observa alguna tendencia en el número y la letalidad de las catástrofes naturales? Los datos de Our *World in Data (R*itchie y Roser, 2018) muestran que la suma de todas las catástrofes registradas —de todo tipo— revela una tendencia al alza hasta aproximadamente el año 2000 y luego empieza a descender. Si examinamos los datos de los distintos tipos de catástrofes, vemos que fenómenos tan diversos como los terremotos, los incendios forestales y las inundaciones muestran esta tendencia: su frecuencia sube hasta el cambio de siglo y luego disminuye o se estabiliza. La tendencia del número de víctimas mortales es menos clara: en algunos casos, como el de las muertes causadas por temperaturas extremas, se observa un aumento con el cambio de siglo, mientras que en otros, como los causados por las sequías, se observa un claro descenso a partir de la década de 1920, que aún continúa. Por último, si te preocupa que te caiga un rayo, te alegrará saber que los datos muestran que el número de víctimas mortales en Estados Unidos ha disminuido en un factor de casi 100 desde 1900 hasta 2015.

Estos datos no son fáciles de interpretar: ¿qué hizo que la frecuencia de muchas catástrofes naturales subiera primero y bajara después? ¿Cambiaron los patrones climáticos de la Tierra? ¿O se trata simplemente de una cuestión de criterios de información diferentes? Es difícil decirlo, sobre todo porque los daños causados por las catástrofes naturales dependen de varios factores: no se trata solo de la intensidad de las fuerzas de la naturaleza, sino de la preparación de las personas para hacer frente al suceso. Por lo tanto, no podemos saber si habrá mayores cambios en las próximas décadas: el actual calentamiento global puede hacer que los fenómenos meteorológicos sean más destructivos y más frecuentes, pero eso no puede decirse con absoluta certeza. Lo que sí podemos decir es que, en general, las catástrofes naturales en el

mundo han causado unas 70.000 víctimas al año desde la década de 2010 hasta ahora. Si la tendencia no cambia, significa que, por término medio, la probabilidad de morir golpeado por cualquiera de los diversos "actos de Dios" posibles, desde inundaciones hasta erupciones volcánicas, es del orden de una entre un millón al año.

Entonces, ¿deberíamos preocuparnos? Sí, absolutamente. En primer lugar, porque aunque la probabilidad de morir es baja, la de sufrir graves daños es mucho mayor. En este sentido, podemos volver a recordar la historia del estadístico que se ahogó en un río de una profundidad media de 1,5 metros. Si vivías en Florencia en 1966, tu probabilidad de morir a causa de una inundación era de aproximadamente el 0,003% (17 víctimas de una población de unas 500.000 personas), pero casi todo el mundo en Florencia se vio afectado negativamente en diversos grados. Además, la probabilidad de morir o sufrir graves daños en una catástrofe natural de gran magnitud depende en gran medida del lugar donde se viva. Si vives en una zona montañosa de una región contigua, no deberías preocuparte por los tsunamis, a menos que pienses en la película 201*2, d*onde las olas del tsunami eran más altas que las montañas del Himalaya. Pero si vives en una isla del Pacífico o del Índico, entonces sí, un tsunami importante tiene una posibilidad significativa de golpearte durante tu vida.

Por ello, tiene sentido planificar con antelación la posibilidad de que se produzcan grandes catástrofes. Como suele ocurrir con los fenómenos críticos, no es posible predecir dónde se producirá exactamente una catástrofe natural ni su magnitud. Eso no significa que no haya que aplicar la sabia estrategia propuesta por el capitán Kirk de la nave estelar Enterprise de la Federación: "Nunca me pongo en una situación sin salida". Es una reafirmación de la mejor estrategia para ganar en el juego de la ruleta rusa: ¡no juegues! Es la estrategia que apliqué cuando mi hija buscaba un apartamento en Florencia para su familia, utilizando una aplicación de GPS para asegurarme de que el apartamento estaba ubicado a una altura lo suficientemente elevada por encima del nivel del mar como para no correr el riesgo de que se inundase en caso de un evento como la inundación de 1966. Quizá no ocurra durante la vida de mi hija, pero ¿por qué arriesgarse? Si vives en California, al menos deberías evitar comprar una casa que se encuentre justo al otro lado de la falla de San Andrés o en medio de un bosque de eucaliptos.

Si no puedes evitar vivir en zonas peligrosas, tu mejor opción para sobrevivir es estar preparado. Si te enfrentas a un incendio forestal que se aproxima a tu casa, tu esperanza consiste en tener el coche preparado y haber planeado de antemano el camino que vas a tomar para alejarte de la zona de riesgo. Le ocurrió a una amiga mía que vivía en Oakland, California, cuando se produjo la tormenta de 1991. Estaba en su casa cuando vio un gigantesco muro de fuego surgiendo del bosque. Ni siquiera tuvo tiempo de ponerse los zapatos, sino que corrió en zapatillas para salvar la vida, consiguió arrancar su coche y escapó de la tormenta. Así pues, si vives en el “callejón de los tornados”, en el centro de Estados Unidos, no debes conformarte con el hecho de que la probabilidad de morir a causa de un tornado sea baja incluso en esa zona, probablemente, menos de una entre un millón al año (Discover the Odds, 2019). La mayoría de la gente que vive en esa región equipa su casa con un “sótano para tormentas”, un refugio subterráneo. Puede que nunca tengas que utilizarlo, pero no tenerlo es un riesgo que no merece la pena correr.

En general, las catástrofes naturales son muy destructivas pero, afortunadamente, son de corta duración, al menos, en su forma más intensa. Una vez que el terremoto ha golpeado, las aguas de las inundaciones se han retirado, el tornado se ha desvanecido en las nubes, llega el momento de mirar alrededor, evaluar los daños y planificar la reconstrucción. Aquí, un factor importante es la escala. Las catástrofes a pequeña escala, como los tornados y los incendios forestales, son espectaculares, pero localizadas. En la mayoría de los casos, pueden destruir algunas casas, pero el daño global es limitado y si las personas afectadas tienen un buen seguro, pueden reconstruir sus viviendas. Esto es lo que ocurrió con la tormenta de Oakland de 1991, en California: el fuego redujo a cenizas algunas casas muy caras en las colinas de la zona, pero cuando llegó el momento de reconstruirlas no fue necesario el tipo de solidaridad comunitaria que los florentinos habían mostrado al reconstruir su ciudad, probablemente, ajena a la orientación cultural de los residentes de las colinas de los alrededores de Oakland (Kirp, 2002). En cambio, la mayoría de los propietarios tenían pólizas de seguro que les permitían reconstruir casas aún más grandes, a veces incluso extravagantes. Tal fue el caso de mi amiga, cuya casa había sido destruida en aquel incendio: ella y su marido pudieron construirse una casa mejor y más grande. Lo que más lamentaban era haber perdido todos los recuerdos de su vida anterior: las fotos de su matrimonio, de

sus hijos, de sus familias. Hoy en día, probablemente, tengas todas esas fotos en la nube, así que incluso en caso de que un incendio forestal destruya tu casa, no perderás los recuerdos de una vida. Eso es más probable que ocurra hoy si tu proveedor de la nube pierde tus registros: le ocurrió al proveedor de la nube MySpace que perdió unos 15 millones de registros de usuarios en 2019 (Kleinman, 2019). Es otro tipo de colapso de Séneca, este, afortunadamente, solo virtual.

Otra cosa es cuando la catástrofe es tan grande que los recursos necesarios para la reconstrucción son insuficientes. Un ejemplo de una catástrofe lo suficientemente grande como para poner a prueba a toda la sociedad es el huracán María de 2017. No fue un huracán excepcionalmente fuerte y ni siquiera uno inesperado. Solo fue lluvia, lluvia y lluvia. Inicialmente, parecía que los efectos habían sido limitados, pero la verdadera dimensión del desastre se hizo evidente meses después. Una de las razones fue la escasa respuesta de las autoridades pero, en realidad, el problema fue que Puerto Rico era —y sigue siendo— pobre. No solo la pobreza había debilitado las infraestructuras de la isla, sino que los pobres carecían de los recursos adicionales que se necesitan cuando la gente tiene que recuperarse de una catástrofe. A este respecto, permíteme citar un extracto del libro de Ariel Lugo *Efectos socio-ecológicos-tecnológicos del huracán María en Puerto Rico* (2019: 49):

> Antes del María, el consenso era hacer que el Gobierno fuera como una empresa privada, sin darse cuenta de que el Gobierno tiende a proporcionar más beneficios porque tiene un mandato de servicio y no un motivo de lucro. La privatización hace ganar dinero a los empresarios, eleva el estatus económico de los políticos que eligieron, pero suele fallar dramáticamente en los servicios públicos a los ciudadanos, sobre todo ante acontecimientos extremos. Un Gobierno operado en razón del lucro del sector privado utilizará la rentabilidad como criterio de acción en contraposición al servicio público y al bien público. El beneficio de la agencia o del sector gubernamental privatizado está asegurado, mientras que parte de los ciudadanos, que ayuda a financiar ese beneficio, se ve abandonada a su suerte.
>
> La mayoría de la gente no se da cuenta de que, cuando se examina objetivamente, el Gobierno, y no las entidades privadas, tiende a prestar servicios de forma más eficiente, es decir, a menor coste por unidad de beneficio. Y esto empeora mucho tras un acontecimiento extremo.

Es aquí donde Lugo da con un punto fundamental: nos estamos volviendo más vulnerables a las catástrofes con nuestro énfasis en la privatización de

todo en nombre de la eficiencia. De este modo, no nos quedan recursos para hacer frente a eventos extremos ni para ayudar a las personas que se ven afectadas y no pueden pagar lo que necesitan. Estamos haciendo la red social más estrecha y eficiente, pero a expensas de la resiliencia. Es más, el propio tejido social se está destruyendo por el énfasis en la eficiencia: la cooperación y la confianza entre ciudadanos desaparecen justo cuando la colaboración —en lugar de la competencia— se convierte en la virtud fundamental para alcanzar la resiliencia que necesitamos para sobrevivir y recuperarnos tras la catástrofe. Lugo (2019: 48) señala también que "ante los efectos abrumadores de un acontecimiento extremo, el espíritu y la voluntad humanos se ponen a la altura de las circunstancias. Muchos puertorriqueños no esperaron la ayuda externa y optaron por levantarse para ayudarse a sí mismos y a sus vecinos".

¿Podría planificarse este tipo de resiliencia incluso antes de que se produzca una catástrofe? Algunas personas parecen dedicarse a este tipo de planificación. En Estados Unidos existe el movimiento de los pre*ppers o* "survivalistas", personas que se preparan para cualquier catástrofe importante que pueda ocurrir, incluido el fin del mundo tal y como lo conocemos (TEOTWAWKI, acrónimo de the *end of the world as we know it).* En muchos casos, los pre*ppers ha*cen hincapié en la preparación individual o de una sola familia, más que en la resistencia de la comunidad, y pueden acumular alimentos, suministros y armas en sus sótanos a la espera de que ocurra lo peor. Un enfoque diferente puede ser común en Europa con el movimiento de Ciudades en Transición que hace hincapié en la acción colectiva para preservar la red social local. Se trata de experimentos para construir la resiliencia a nivel comunitario mediante la colaboración, los recursos locales, la agricultura local y, a veces, el uso de monedas locales. No parece que los supervivientes o la gente de las ciudades en transición hayan sido puestos a prueba todavía por una verdadera situación de emergencia, por lo que no sabemos hasta qué punto estas ideas resistirán el contacto con la realidad. En principio, ambas ideas pueden ser buenas en algunas circunstancias, pero, como de costumbre, nos adentramos en el futuro sin estar seguros de estar tomando la dirección correcta.

COLAPSO DE LOS MINERALES: ¿LA PRÓXIMA CRISIS DEL PETRÓLEO?

En 2003, asistí a mi primera conferencia sobre el agotamiento del petróleo en París. Allí conocí a las grandes figuras de los expertos que habían renovado el interés mundial por el agotamiento del petróleo y habían fundado la Asociación para el Estudio del Pico del Petróleo (ASPO): Colin Campbell, Jean Laherrère, Ali Morteza Samsam Bakhtiari, Matthew Simmons y muchos otros. En París, todo parecía nuevo, notable, emocionante: estábamos montados en una ola de interés por el agotamiento del petróleo que había comenzado en 1998 con un artículo de Campbell y Laherrère en *Scientific American*, titulado "The End of Cheap Oil". La repercusión de ese artículo había sido enorme: entre duras críticas y entusiasta aceptación, el término que Colin Campbell había acuñado, "pico del petróleo", había ganado rápidamente popularidad en todo el mundo.

Para mí, la conferencia de París fue el inicio de mi interés por el colapso. Es cierto que el concepto de pico del petróleo no implicaba que el declive fuera más rápido que el crecimiento. Aunque, ya en 2005, publiqué mi primer artículo sobre el agotamiento del petróleo, en el que constataba las condiciones que conducían a lo que denominé "curva de colapso en forma de diente de sierra". La idea de llamarla "curva de Séneca" surgió mucho más tarde. No fui el único que encontró fascinante el concepto de pico del petróleo. La importancia del petróleo como principal soporte de la civilización era bien conocida, pero la idea de que el petróleo empezaba a escasear proporcionaba una nueva interpretación de los acontecimientos pasados, desde la gran crisis del petróleo de los años setenta hasta los atentados de 2001 contra el World Trade Center en Nueva York. El pico del petróleo entrañaba un cierto aire de apocalipsis, sobre todo porque mucha gente entendía que el pico era lo mismo que quedarse sin petróleo. No todo el mundo entendió tan mal el concepto, pero el pico del petróleo, se decía, significaba el fin del mundo tal y como lo conocemos y más valía que estuviéramos atentos al castigo que nos preparaban las oscuras divinidades del líquido negro que se encuentra en el subsuelo.

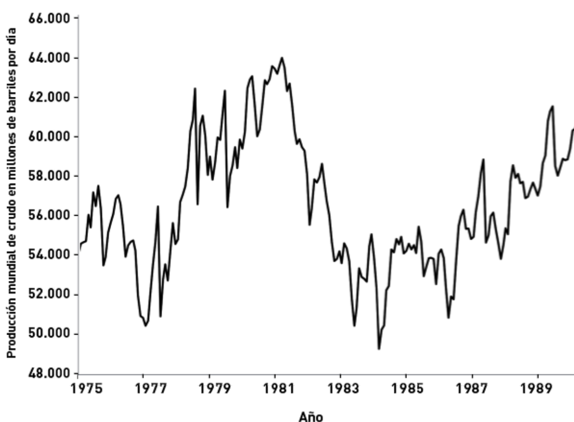
La popularidad del concepto del pico del petróleo alcanzó niveles elevados a principios del año 2000, pero duró poco. Es posible que alcanzara su punto álgido en torno a 2006 y luego, mucho antes de que pudiera decirse que cualquiera de las previsiones sobre el pico del petróleo había sido correcta o errónea, empezó a declinar (Bardi, 2019). Ni siquiera el gran repunte del precio del petróleo en 2008 generó más que un repunte transitorio de interés.

Con el tiempo, llegó una nueva oleada de optimismo y el concepto de pico del petróleo se convirtió en algo políticamente innombrable, a veces fuente de desprecio para quienes todavía se atrevían a proponerlo.

La parábola del pico del petróleo es solo un ejemplo de cómo las preocupaciones humanas tienden a seguir ciclos. Erwin Schlesinger, exsecretario de Estado de Estados Unidos, dijo que las personas solo tienen dos modos de funcionamiento: la complacencia y el pánico. También puede ser que estos dos modos tiendan a darse en ciclos, sustituyéndose periódicamente. Así, la oleada de interés por el agotamiento del petróleo que se inició en 1998 no fue la primera: la idea había ido fluyendo a lo largo del gran ciclo de explotación del crudo. Ya en los años cincuenta, el geólogo estadounidense Marion King Hubbert propuso su "curva en forma de campana", generando un primer ciclo de interés que se desvaneció en los años ochenta con la ola de entusiasmo por Internet y la economía "puntocom". Es muy posible que la actual fase de complacencia dé lugar a una nueva fase de pánico en un futuro próximo. En el caso del crudo, el término "pánico" está justificado. Sin combustibles líquidos, todo se detendría en el mundo. Recientemente, Alice Friedemann publicó un estudio sobre este tema, *When the Trucks Stop Running* (2016), y el título, por sí solo, lo dice todo. Sin combustibles, sin camiones, sin alimentos, sin civilización. ¿Podría ocurrir realmente?

Es posible. Algo similar ya ocurrió con la gran "crisis del petróleo" de la década de los setenta que durante un periodo pareció destruir los cimientos mismos de la civilización occidental. Si uno vivió esa crisis, no puede olvidar lo que ocurrió: precios de la gasolina que se dispararon de repente, largas colas en las gasolineras, Gobiernos que promulgaban todo tipo de medidas: límites de velocidad más bajos en las carreteras, planes de "racionamiento impar-par", apoyo a la producción de coches pequeños, etc. El impacto en el sistema financiero fue aún peor: recesión e inflación de dos dígitos. Fue un desastre para un mundo que había experimentado, hasta entonces, más de dos décadas de crecimiento económico ininterrumpido. Los datos muestran que la producción mundial de petróleo había empezado a descender más rápido de lo que había crecido antes del pico. Era un caso claro de curva de Séneca (figura 18).

FIG**URA 18**
PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO EN LA ÉPOCA DE LA GRAN CRISIS DEL PETRÓLEO DE LOS AÑOS SETENTA

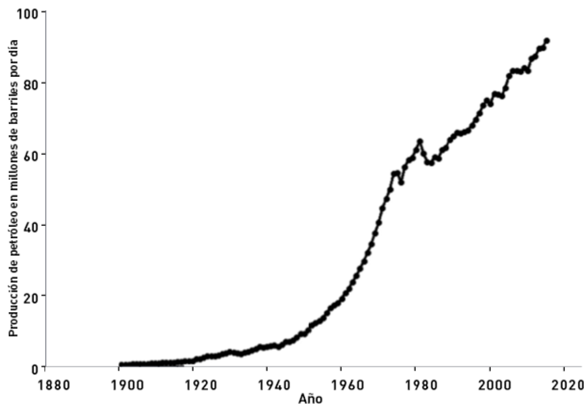


Fuente: IEA.

Con el tiempo, la crisis iniciada en la década de los setenta remitió. Con el desarrollo de nuevos yacimientos de petróleo, como los del mar del Norte, la producción empezó a crecer de nuevo. A mediados de los ochenta se volvieron a alcanzar los niveles de producción anteriores a la crisis y luego se superaron. En las décadas siguientes, el mercado mundial del petróleo resultó ser notablemente resistente: vimos guerras, colapsos, crisis internacionales y todo tipo de cambios y desastres. Pero el crudo y el gas natural siguieron fluyendo por todo el mundo.

Hoy en día, los acontecimientos de los años setenta forman parte de la "niebla de la memoria" de la humanidad, una niebla que convierte en historia antigua todo lo que tiene más de unos pocos años (o incluso menos). Así, la historia de la crisis del petróleo se convirtió en algo que parece un antiguo mito del bien contra el mal. Tal y como se suele contar, se trata de un grupo de jeques árabes ávidos de poder (o tal vez ayatolás) que habían intentado apoderarse del mundo utilizando el petróleo como arma. Pero sus esfuerzos fueron finalmente frustrados por la buena gente de Occidente que encontró nuevas fuentes de petróleo. A partir de entonces, todo fue bien en el mejor de los mundos.

FIGURA 19
PRODUCCIÓN MUNDIAL DE PETRÓLEO (TODOS LOS LÍQUIDOS)



Fuente: The Shift Project.

Hay algunos elementos de verdad en esta versión simplificada de la historia. Si observamos los datos de la producción mundial durante el último siglo, más o menos, podemos ver que el aumento ha sido casi continuo. Es cierto que el gráfico es optimista porque informa de los volúmenes producidos y no de la energía, que es lo que nos interesa, aunque, en general, el crecimiento de la producción de petróleo es un fenómeno real (figura 19).

Pero sigue existiendo en nuestra conciencia colectiva un profundo malestar derivado de la constatación de lo frágil que es nuestra prosperidad. No en vano, la llamada "Doctrina Carter" se formuló durante los años de la crisis del petróleo. En ella se afirmaba que los intereses de las regiones de Oriente Medio eran vitales para Estados Unidos y que este país consideraría todos los ataques a estas regiones como una amenaza a su seguridad nacional. Hay una lógica en esta actitud: una gran fracción de las reservas de petróleo del mundo se encuentra en esta región. Si algo va mal con la producción de petróleo de uno de los principales productores de petróleo de Oriente Medio, Irak, Irán y Arabia Saudí, afectará no solo a Estados Unidos, sino a todo el mundo. Parece que la seguridad energética del mundo pende de factores políticos que pueden crear repentinamente problemas inesperados: esto fue lo que ocurrió con la gran crisis del petróleo de la década de 1970. Y la pregunta es: ¿podría volver a ocurrir?

Para responderla, podemos partir de una de las frases favoritas de Colin Campbell, uno de los primeros defensores del concepto "pico del petróleo": "La disponibilidad actual de crudo depende de los acontecimientos que tuvieron lugar durante el periodo jurásico y en los que no puede influir la política". En otras palabras, el suministro de petróleo es finito a pesar de que

algunos políticos afirmen lo contrario (Sondland, 2019) y también a pesar de los esfuerzos de un grupo de opositores a este concepto que tratan de impulsar la idea de que los recursos petrolíferos son realmente infinitos, siendo regenerados continuamente por misteriosos "procesos abióticos" que operan en las profundidades de la Tierra (Höök et *al.*, 2010). No funciona así, si eres un adulto, deberías saber que después de comerte el pastel, ya no lo tienes.

La industria petrolera parece ser perfectamente consciente de las limitaciones de los recursos disponibles y dedica considerables esfuerzos a estimar el tamaño de la "tarta" de petróleo disponible. Obviamente, estos esfuerzos se ven estimulados por el hecho de que los recursos son un factor que atrae las inversiones. Como te puedes imaginar, no es una tarea fácil evaluar la cantidad de algo que se encuentra a kilómetros bajo tierra, pero existen sofisticadas tecnologías de medición que, unidas a un tratamiento estadístico aún más sofisticado de los datos, permiten a la industria realizar estimaciones razonablemente precisas de los recursos que previsiblemente se esconden bajo tierra.

El problema de las estimaciones de recursos no es tanto técnico como político: la búsqueda de una posición de privilegio en el mundo del petróleo puede llevar a algunos Gobiernos o consejos de administración de empresas a "ajustar" los resultados de sus análisis. En un artículo de 1998, Colin Campbell y Jean Laherrère señalaron que las estimaciones de las reservas de petróleo de seis países de Oriente Medio miembros de la OPEP experimentaron un brusco aumento a mediados de la década de 1980, creando un total de 300.000 millones de barriles adicionales de petróleo sin haber comunicado grandes descubrimientos de nuevos yacimientos. Se puede sospechar, al menos, que las estimaciones han sido retocadas, y no poco, con fines políticos. Los Gobiernos occidentales no son inmunes a las afirmaciones exageradas. Como ejemplo, en 2016 se dio mucha repercusión en los medios de comunicación al "descubrimiento de nuevas reservas de petróleo" en Texas, unos 20.000 millones de barriles cuyo valor se calculó en unos 900.000 millones de dólares (Bardi, 2016). Un problema era que no se trataba de un "descubrimiento", sino simplemente de una nueva estimación de la cantidad de petróleo técnicamente recuperable en yacimientos conocidos. Pero había un problema mucho mayor que señaló Arthur Berman (2016):

¿De dónde sale el valor de 900.000 millones de dólares? Multiplica 20.000 millones de

barriles por 45 dólares por barril y se obtienen 900.000 millones de dólares. En otras palabras, esto sería así si el petróleo saliera mágicamente de la tierra sin el coste de perforar y completar los pozos, si no hubiera costes de explotación para producirlo, si no hubiera impuestos ni cánones.

Según los datos aportados por el USGS, harían falta 196.253 pozos para producir los 20.000 millones de barriles, si es que existen. A 7 millones de dólares por pozo, eso costaría casi 1,4 billones de dólares solo en costes de perforación y terminación.

Costaría más de 1,4 billones de dólares generar 900.000 millones de dólares de ingresos, lo que supondría una pérdida neta de 500.000 millones de dólares a precios de petróleo de 45 dólares, sin contar todos los gastos de explotación, impuestos y cánones, y sin descuentos.

Es un descubrimiento que nadie puede permitirse.

Pero hay un problema aún mayor con las estimaciones sobre las reservas. Suponiendo que sean correctas, nos dicen algo sobre los volúmenes que podemos extraer, pero nada sobre el coste de la extracción. Como se puede imaginar, esto es más que un pequeño problema: es como evaluar el poder militar de un país simplemente contando el número de soldados que puede desplegar, sin tener en cuenta su poder armamentístico y su voluntad de luchar. Ese es un error que cometió Saddam Hussein cuando intentó retener Kuwait en 1991, solo un ejemplo entre muchos otros. El hecho de que unos tipos con rifles estén en una trinchera, en algún lugar, no significa que vayan a ser capaces de luchar eficazmente y, del mismo modo, el hecho de que exista algún "petróleo extraíble", en algún lugar, no significa que vaya a ser extraído, a menos que alguien esté dispuesto a pagar los costes correspondientes.

A pesar de la sofisticación técnica que despliegan en la tarea, las petroleras —como todas las empresas mineras— parecen tener poco o ningún interés en utilizar modelos que tengan en cuenta los costes de extracción de las reservas minerales para estimar la producción futura. El modelo más sofisticado que suelen utilizar para atisbar un futuro incierto es la "ratio reserva/producción" (R/P). Funciona dividiendo la cantidad actual estimada de reservas por la tasa de producción anual. El resultado es una cifra que puede interpretarse como el número de años que podría durar la producción al ritmo actual antes de que el recurso se agote por completo.

La razón por la que las empresas (y también los políticos) adoran la relación R/P es que normalmente proporciona un número de años cómodamente amplio antes de que se agote algo. En el caso del petróleo, por ejemplo, la relación R/P se sitúa hoy en día en unos 50 años, la del carbón en unos cuantos siglos o, en algunos supuestos, en más de mil años. La mayoría de la gente

entiende, a partir de estos datos, que no hay nada de qué preocuparse en lo que respecta al petróleo hasta dentro de al menos 50 años y que, para entonces, será un problema de otros. Y si realmente tenemos mil años de carbón, ¿a qué viene tanto alboroto? Si se añade el hecho de que la relación R/P ha ido aumentando a lo largo de los años, se entienden las razones de una afirmación bastante conocida de Peter Odell, quien en 2001 dijo: "Estamos 'entrando en el petróleo' en lugar de 'salir' de él". De acuerdo con esta visión, extraer un recurso mineral es un poco como comerse un pastel; mientras quede algo de tarta, no hay de qué preocuparse. En realidad, el peculiar pastel que es el petróleo crudo tiene la característica de que se hace más grande a medida que se come.

Entonces, si todavía hay mucho pastel para comer hoy, seguramente hubo incluso más en la época de la gran crisis del petróleo de los años setenta. Entonces, tal vez sea cierto que la crisis fue culpa de esos malvados jeques árabes, ¿no es así? De nuevo, las personas adultas deberían reconocer que culpar de su problema a unos malvados personajes no es la mejor manera de resolverlo.

Como suele ocurrir con los sistemas complejos, la crisis del petróleo de los años setenta fue un fenómeno complejo generado por una cadena de efectos de retroalimentación. El agotamiento fue un factor desencadenante, pero no fue en sí mismo la causa del desastre. Y lo mismo puede decirse de los factores políticos. No fueron la "causa" de la catástrofe, como tampoco una gota fue la causa de que se colmara el vaso, como dice el refrán. La crisis del petróleo de los años setenta fue un problema del tamaño del grifo, no del depósito. Por mucho petróleo que hubiera, en algún lugar del subsuelo, la capacidad de la industria para extraerlo era insuficiente para satisfacer la creciente demanda. Es un problema que Arthur Berman enmarcó perfectamente cuando dijo que considerar solo los recursos petrolíferos subterráneos es como "si el petróleo saltara mágicamente del suelo sin el coste de perforar y completar pozos; si no hubiera costes de explotación para producirlo; si no hubiera impuestos ni cánones" (Berman, 2016).

Más concretamente, el problema en los años setenta era que la industria no podía seguir ampliando el grifo a un ritmo exponencialmente creciente, como había sido la norma desde aproximadamente 1940 hasta 1970. Durante ese periodo, la producción se duplicaba cada 10 años y, de hecho, en unos 30 años se había multiplicado por casi 10. Si hubiera seguido duplicándose en todo el

mundo al mismo ritmo hasta nuestros días, se habría duplicado 5 veces más y hoy la industria petrolera produciría unas 30 veces más petróleo que en 1970. Partiendo de unos 50 millones de barriles diarios, la producción habría llegado hoy al fantástico valor de mil millones y medio de barriles diarios, si bien, en realidad, es inferior a 100 millones de barriles.

Por supuesto, eso no podía suceder y no sucedió. No solo era físicamente imposible mantener el crecimiento de la producción durante tanto tiempo, sino que, mientras tanto, el calentamiento global nos habría dejado a todos bien cocidos. Por tanto, la crisis del petróleo no fue un error sino una característica: fue un ajuste necesario para frenar el sistema y hacerlo compatible con el mundo real. Esta interpretación se ve confirmada por el hecho de que se había predicho con antelación basándose exactamente en estas consideraciones. En los años setenta, Pierre Wack y su grupo de Shell Oil aplicaban una tecnología llamada "análisis de escenarios" a la producción de petróleo y habían observado que la evolución del mercado petrolero conducía a una situación completamente diferente de la que había sido habitual durante las últimas décadas. Escribió en 1985 que:

- El mercado del petróleo, caracterizado durante mucho tiempo por un exceso de oferta, iba a pasar a ser un mercado de vendedores.
- Pronto no habrá prácticamente ninguna capacidad de suministro de crudo de reserva.
- Inevitablemente, Oriente Medio y, en particular, el golfo Pérsico serían la fuente de equilibrio del suministro de petróleo.
- La gran demanda de producción de Oriente Medio conllevaría una fuerte reducción del ratio reservas-producción de Oriente Medio si se cumple.
- No se permitiría que tuviera lugar el elevado pico de producción de Oriente Medio. Los factores que intervienen son el deseo de los países árabes de prolongar la vida de su único recurso valioso y el acaparamiento del mercado mundial de la energía por parte de los productores del Golfo durante unos 10 o 15 años, limitando la producción.
- Solo algo parecido a una depresión mundial sostenida podría reducir el crecimiento de la demanda de petróleo de Oriente Medio hasta niveles en los que el mercado de vendedores previsto sería demasiado débil para conseguir precios del petróleo sustancialmente más altos.

Wack escribió sobre las consecuencias que tendría:

Hace más de 20 siglos, Cicerón señaló: "Al principio del mundo se ordenó que ciertas señales prefiguraran ciertos acontecimientos". Cuando preparamos los escenarios de 1973, todos los signos económicos apuntaban a una importante interrupción del suministro de petróleo. Los nuevos análisis preveían una estrecha relación entre la oferta y la demanda en los próximos años.

Ahora vemos la discontinuidad como algo predeterminado. Independientemente de lo que ocurriera en particular, los precios subirían rápidamente en los años setenta y la producción de petróleo se vería limitada, no por una escasez real de petróleo, sino por razones políticas, ya que los productores se aprovecharían de la ajustada relación entre oferta y demanda. Nuestro siguiente paso fue convertir la interrupción en nuestro escenario sin sorpresas. No sabíamos cuándo se produciría, ni cuánta sería la subida de precios, ni cómo reaccionarían los distintos actores. Pero sabíamos que ocurriría.

En los años sesenta, las reservas de petróleo se consideraban abundantes y no se preveía ningún problema de suministro a corto y medio plazo. El problema era cómo encontrar los recursos financieros necesarios para que la producción siguiera creciendo como lo había hecho durante la década anterior. Hoy, la situación es similar pero peor: el problema es cómo encontrar los recursos financieros necesarios para mantener la producción al menos tan estable (en términos energéticos) como lo ha sido durante la última década. En ambos casos, la tarea no era ni es imposible, pero es seguramente difícil. En 1973, el choque geopolítico relativamente menor de la guerra árabe-israelí hizo que el sistema cayera por la pendiente de Séneca. Hoy, otro choque geopolítico podría tener el mismo efecto.

Hay factores, hoy en día, que podrían crear una nueva crisis del petróleo, posiblemente mucho peor que la que comenzó en los años setenta. Por el lado de la demanda, la industria de los combustibles fósiles se ve amenazada por varios factores. Las energías renovables, como la solar y la eólica, ya producen energía a costes más bajos que las de los fósiles y eso puede estar empujando al carbón hacia la extinción. Los cambios en el mercado del transporte también están modificando las reglas del juego. Los combustibles líquidos se utilizan principalmente en el transporte: normalmente un buen 50% de la producción de la industria petrolera es gasolina. A esto hay que añadir un 20% de gasóleo y el resultado es que alrededor del 70% de la producción de la industria se destina a los motores de combustión interna utilizados para el transporte. Este mercado se ve amenazado por dos factores: uno es el aumento continuo de los vehículos eléctricos, el otro, la propagación del concepto de "Transporte como Servicio" (TAAS, por sus siglas en inglés) (RethinkX, 2018). Los coches eléctricos pueden alimentarse con electricidad producida por cualquier fuente y la preferencia se dirigirá razonablemente a las energías renovables, ya que son limpias y baratas. El TAAS, por tanto, puede hacer que los coches individuales queden tan obsoletos como el uso de abrigos hechos con pieles de

oso curtidas en casa. El concepto de TAAS no se basa necesariamente en los vehículos eléctricos, pero sin duda puede reducir el número de coches en la carretera, promover vehículos más eficientes y una forma más eficiente de utilizarlos. El resultado final será probablemente una reducción de la demanda de productos petrolíferos.

Estos factores pueden hacer mella en el mercado de la industria petrolera como resultado del "colapso de la demanda", un término que parece ser más aceptable en el debate general que el empañado término de "agotamiento". Pero el agotamiento también está royendo los beneficios de la industria fósil. Por muy entusiasmado que esté uno con el "milagro" del petróleo de esquisto, es un hecho que los milagros no existen y que el agotamiento va a hacer que la extracción de crudo, gas y carbón sea cada vez más cara con el paso del tiempo. Varias regiones productoras ya han pasado por su pico de Hubbert, sumiéndose a menudo en guerras y disturbios sociales como resultado de ello. Muchas de las principales guerras actuales se sitúan en regiones que vieron disminuir la producción nacional de petróleo: Yemen, Siria y Venezuela son algunos ejemplos.

Al final, no importa tanto si el problema está relacionado con la oferta o con la demanda, son dos caras de la misma moneda. Nada se produce a un precio demasiado alto para que los clientes lo paguen, y los clientes nunca comprarán algo que no puedan pagar. Así pues, el destino de la industria petrolera bien puede ser el de caer en un espectacular colapso debido a la vela que arde por los dos extremos: agotamiento por un lado, descenso de la demanda por el otro, es otro ejemplo típico del concepto de "crisis dinámica" que genera el precipicio de Séneca. No hace falta una gran reducción de la demanda de combustibles para el transporte para generar una espiral de declive de la industria petrolera. Menos demanda significa menos producción, menos producción significa la pérdida de economías de escala, y la pérdida de las economías de escala significa costes más altos que se traducen en precios más altos que también deprimen la demanda. Y así hasta que se toca fondo. Como dijo Lucio Anneo Séneca, hace mucho tiempo, "la ruina es rápida".

Así pues, existe una probabilidad significativa de que se produzca un escenario de crisis del petróleo en un futuro próximo. Podría desencadenarse por un declive de la producción de petróleo de esquisto en Estados Unidos, quizá, unido a un choque político que redujera la capacidad de exportación de otros productores, como Arabia Saudí o Irán. Los resultados serían similares a

los observados en la década de 1970: los precios del petróleo se dispararían, las economías de los países industriales entrarían en recesión y los Estados importadores tendrían que aplicar medidas para reducir el consumo de petróleo. Aunque hoy en día no dependemos tanto del petróleo para la producción de energía eléctrica como en los años setenta, seguimos siendo muy dependientes de los combustibles líquidos para el transporte, ya que cerca del 85% de la producción de petróleo se destina a combustibles. En realidad, es posible que hoy dependamos más *del* petróleo para el transporte porque, en todas partes, la tendencia a la expansión urbana ha generado aglomeraciones suburbanas de viviendas y centros comerciales a los que difícilmente puede llegar el transporte público. Así, una nueva crisis del petróleo volvería a generar largas colas en las estaciones de servicio y podría ser necesario el racionamiento de combustible. La nueva crisis del petróleo podría ser mucho más destructiva que las anteriores, teniendo en cuenta además que hoy carecemos del equivalente a los flamantes yacimientos de petróleo del mar del Norte para que acudan al rescate, como ocurrió en los setenta.

Pero una nueva crisis del petróleo puede no ser tampoco algo malo. Dado que hemos sido sistemáticamente incapaces de frenar el consumo de combustibles fósiles para reducir las emisiones de carbono, puede que el pico del petróleo o, más exactamente, el colapso Séneca de la industria petrolera, resuelva el problema climático haciendo que las emisiones se desplomen antes de que se alcance y supere el malogrado "umbral de los 2 grados". ¿Y si eso no es suficiente? Es decir, ¿qué pasa si ya se ha superado el umbral y nos encontramos ante el temido punto de inflexión climático que conduce a un cambio climático desbocado? En ese caso, las dos sectas actuales de catastrofistas estarían satisfechas: moriríamos en el fuego y en el hielo, ¡y seguro que eso sería suficiente!

EL PRECIPICIO DE SÉNECA Y LA VIOLENCIA HUMANA: DISPUTAS FATALES

Hace años, me encontraba en algún lugar del centro de Tokio, en un lugar desde el que podía tener una buena vista de una gran extensión de carreteras, plazas y zonas en las que se estaban construyendo nuevos rascacielos, una vista

poco frecuente en una ciudad que no parece valorar su propio horizonte como atracción turística. Sentado en un banco, cerca de allí, había un anciano japonés. Tal vez porque yo era un evidente gai*jin, u*n extranjero, se esforzó por contarme en una mezcla de japonés e inglés cómo era el lugar que nos rodeaba cuando él era joven, justo después del final de la Segunda Guerra Mundial. En un momento dado, arqueó el brazo, como para abarcar toda la ciudad, y dijo algo así como "todo destruido, nada, nada, todo igual, min*a onaji…*". Yo sabía a qué se refería: había visto fotos de Tokio después del bombardeo de 1945 y era exactamente lo que este anciano estaba describiendo. Los aliados habían utilizado bombas incendiarias contra las casas de la ciudad, en su mayoría de madera: los incendios no solo lo habían arrasado todo, sino que dejaron sin posibilidad alguna a los habitantes, que se encontraron atrapados sin vías de escape. En Tokio, las bombas incendiarias mataron a unos 100.000 civiles en un solo bombardeo en la noche del 9 al 10 de marzo de 1945.

Con el paso de los años, se ha construido un nuevo Tokio sobre las ruinas del destruido, pero en todas partes, la ciudad sigue dando una cierta sensación de temporalidad, algo así como vivir en el mundo de los poemas de Basho. Cada vez que un pequeño terremoto sacudía el edificio de la Universidad de Tokio, donde yo trabajaba entonces, era un poco como oír al bueno de Godzilla pisando fuerte con sus gigantescas patas a la vuelta de la esquina. Y es difícil caminar por Tokio y no darse cuenta de que las grandes avenidas que cruzan las manzanas de la ciudad tienen un propósito. Fueron diseñadas para actuar como barreras contra la propagación de incendios en caso de una nueva ola de bombardeos incendiarios.

Las ciudades del mundo occidental están libres de bombardeos aéreos desde hace más de medio siglo, con algunas excepciones, como el caso de Belgrado en 1999. Pero algunas personas en Europa son lo suficientemente mayores como para recordar las incursiones diarias, las carreras hacia los refugios antibombas, los destellos, el humo y el terrible ruido de las bombas que caen. Cuando desaparezcan, no quedará ningún recuerdo vivo de aquellos momentos, pero sí algún recuerdo físico, por ejemplo en forma de carteles desvaídos de "refugio antibombas" en algunos edificios antiguos. El jardín de la casa en la que vivo ahora aún conserva un refugio ojival de hormigón utilizado durante la Segunda Guerra Mundial por los habitantes para defenderse de los incendios y los fragmentos. Es tan pesado que nadie sabe

cómo deshacerse de él y por eso sigue ahí. Tal vez vuelva a ser útil en el futuro, ¿quién puede decirlo?

Hoy en día, nos esforzamos por olvidar lo que es la guerra, pero sigue con nosotros, un fantasma que parece que no podemos exorcizar. Hay una cita atribuida a León Trotsky que dice: "Puede que no te interese la guerra, pero la guerra está interesada en ti". Trotsky probablemente nunca dijo eso, pero es una buena descripción del hecho de que cuando empieza una guerra tienes pocas o ninguna posibilidad de evitar que te afecte.

León Tolstói fue uno de los primeros en especular sobre las razones de la guerra cuando escribió en su novela Gue*rra y paz (1*867):

Para nosotros es incomprensible que millones de hombres cristianos se hayan matado y torturado unos a otros porque Napoleón era ambicioso o Alejandro era firme, o porque la política de Inglaterra era astuta o el duque de Oldenburgo se equivocaba. No podemos comprender qué relación tienen tales circunstancias con el hecho real de la matanza y la violencia: por qué, porque el duque se equivocó, miles de hombres del otro lado de Europa mataron y arruinaron a la gente de Smolénsk y Moscú, y fueron asesinados por ellos.

Para nosotros, sus descendientes, que no somos historiadores ni nos dejamos llevar por el proceso de investigación y que, por lo tanto, podemos contemplar el acontecimiento con un sentido común despejado, se presenta un número incalculable de causas. Cuanto más profundizamos en la búsqueda de estas causas, más encontramos; y cada causa separada o toda la serie de causas nos parece igualmente válida en sí misma e igualmente falsa por su insignificancia en comparación con la magnitud de los acontecimientos, y por su impotencia —aparte de la cooperación de todas las demás causas coincidentes— para provocar el acontecimiento. Para nosotros, el deseo o la objeción de este o aquel cabo francés de servir un segundo periodo parece tan causal como la negativa de Napoleón a retirar sus tropas más allá del Vístula y a restaurar el ducado de Oldemburgo; porque si no hubiera querido servir, y si un segundo, un tercero y un milésimo cabo y soldado también se hubieran negado, habría habido muchos menos hombres en el ejército de Napoleón y la guerra no habría podido ocurrir.

[…] Sin cada una de estas causas nada podría haber sucedido. Así que todas estas causas —miles de causas— coincidieron para que ocurriera. Y así, no hubo una sola causa para que ocurriera, sino que tuvo que ocurrir porque tenía que ocurrir. Millones de hombres, renunciando a sus sentimientos humanos y a su razón, tuvieron que ir de oeste a este para matar a sus semejantes, al igual que algunos siglos antes las hordas de hombres habían llegado desde el este al oeste matando a sus semejantes.

[…] Era necesario que millones de hombres en cuyas manos estaba el verdadero poder —los soldados que disparaban o transportaban provisiones y armas— consintieran en cumplir la voluntad de estos débiles individuos, y que hubieran sido inducidos a hacerlo por un número infinito de causas diversas y complejas.

[…] Cuando una manzana ha madurado y se cae, ¿por qué se cae? ¿Por su atracción por la

tierra, porque su tallo se marchita, porque la seca el sol, porque se hace más pesada, porque el viento la agita o porque el niño que está abajo quiere comerla?

[…] Y así no hubo una sola causa para la guerra, sino que ocurrió simplemente porque tenía que ocurrir.

Tolstói no era un científico, pero estas palabras podrían haber sido escritas por un científico moderno versado en la ciencia de los sistemas. Una característica de los sistemas complejos es que su comportamiento difícilmente puede describirse en términos de "causas" y "efectos", sino que cambian, se mueven y evolucionan como resultado de la interacción de forzamientos y retroalimentaciones. Esta era la intuición de Tolstói, que no había visto la guerra patria de 1812 en persona, pero que había estado con el ejército ruso durante la guerra de Crimea (1853-1856) y el sitio de Sebastopol en 1855. Esa guerra está hoy casi olvidada, pero proporciona otro ejemplo, por si fuera necesario, de un conflicto totalmente inútil. ¿Por qué se libró? Aparte de algunos pretextos tontos sobre la libertad de culto de algunas sectas religiosas, nadie parecía saberlo con certeza en aquella época y difícilmente se encontraría a alguien hoy en día que pudiera explicarlo tampoco. Sin embargo, la guerra de Crimea prefiguró las guerras mucho más grandes y cataclísmicas del siglo XX, hasta el punto de que podríamos llamarla, con razón, "Guerra Mundial Cero" (Bardi, 2017).

Después de Tolstói se han publicado muchos estudios y evaluaciones de la guerra como fenómeno social y, hoy en día, parece que vemos la guerra con cierto grado de optimismo, quizás porque el mundo no ha visto otra gran guerra mundial después de la Segunda Guerra Mundial durante unos 60 años, hasta ahora. Entre las valoraciones más optimistas, tenemos la de Steven Pinker con su conocido libro Los *mejores ángeles de nuestra naturaleza (20*11). La tesis de Pinker es que los tiempos modernos se volvieron menos violentos durante las últimas décadas, y que es una tendencia que se mantendrá en el futuro. Otros análisis históricos de la guerra también son optimistas. Según Rudolph Rummel (1932-2014), las democracias son mucho menos propensas a entrar en guerras que las dictaduras (Rummel, 2004). Según esta interpretación, promover la democracia podría ser una buena manera de evitar las guerras y las tendencias hacia una mayor democracia en el mundo podrían ser una razón por la que podríamos estar viviendo en tiempos menos problemáticos que en el pasado. Puede que sea por Rummel por lo que la idea de "exportar la democracia" se ha hecho tan popular hoy en día, aunque de una

forma que nos deja a muchos un poco perplejos.

En cualquier caso, tanto Pinker como Rummel basan sus conclusiones en datos históricos y es posible que tengan razón para el rango de tiempo que consideran: las últimas décadas o, como mucho, el siglo XX. Es cierto que la "grande", la Segunda Guerra Mundial, fue probablemente la guerra más destructiva de la historia y que después no hubo más guerras de tamaño comparable. Pero ¿se trata de una verdadera tendencia a largo plazo o solo de una fluctuación estadística? (Pearl y Mackenzie, 2018). La actual situación política mundial no parece dar pie al optimismo, ya que hoy en día se vuelven a intercambiar amenazas de aniquilación nuclear, como estaba de moda en los años cincuenta.

Para entender a qué nos enfrentamos, necesitamos datos que vayan más allá de las últimas décadas y, en la medida de lo posible, más allá del siglo pasado. La tarea de analizar las guerras desde un punto de vista estadístico a largo plazo fue intentada por primera vez por el físico británico Lewis Fry Richardson (1881-1953). Richardson se adelantó en muchos aspectos a su época y sus contribuciones en campos como la meteorología y el análisis fractal fueron tan avanzadas que tardaron en formar parte del conocimiento general. También fue un pacifista que trató de entender qué genera las guerras y cómo podríamos, tal vez, evitarlas. Así, realizó una serie de análisis sobre la frecuencia y el tamaño de las guerras humanas y, más en general, de lo que él llamaba "disputas fatales", aquellas interacciones humanas que terminan con la muerte de alguien.

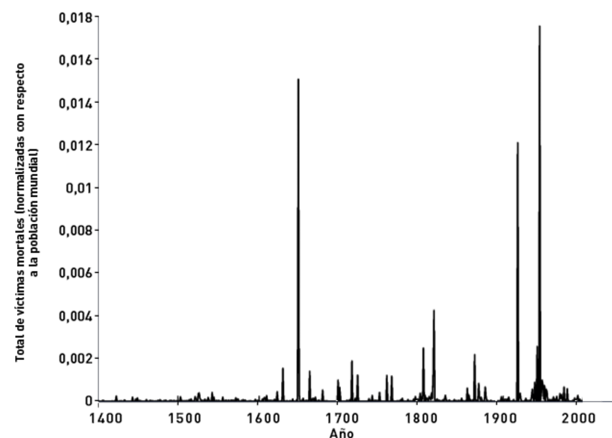
Richardson (1960) propuso que las guerras y los homicidios tienden a seguir una "distribución de Poisson". Con el tiempo, se descubrió que las guerras constituyen otro tipo de fenómeno crítico (Hess, 1995; Martelloni, Di Patti y Bardi, 2018). Al igual que los terremotos y los incendios, las guerras tienden a seguir leyes de potencia. Las intuiciones iniciales de Richardson fueron confirmadas por estudios posteriores. Permitidme mostraros algunos datos de la base de datos preparada por Brecke (2018), que abarca unos 600 años de historia de la humanidad. Junto con mis colaboradores, Martelloni y Di Patti, analizamos estos datos en un trabajo reciente (Martelloni, Di Patti y Bardi, 2018) (figura 20).

Vemos que la historia de las guerras está dominada por unos pocos conflictos muy grandes (en la figura se muestra normalizado para la población mundial). El panorama parecía relativamente tranquilo hasta mediados del

siglo XVII y luego comenzaron una serie de "picos" de guerra. Algunos son especialmente grandes y reconocibles: la guerra de los 30 años, las campañas napoleónicas, la guerra de Crimea, la Primera y la Segunda Guerra Mundial. Es difícil ver aquí una tendencia continua: lo que podemos decir es que, a lo largo de 600 años de guerras, el número absoluto de estas ha aumentado, pero ha disminuido si lo relacionamos con el aumento de la población mundial. Luego, si observamos la frecuencia de las guerras en función de su tamaño, encontramos la típica distribución de "ley potencial" de los fenómenos críticos. Es decir, las guerras grandes son menos frecuentes que las pequeñas, pero existe una "cola gruesa" en la distribución que hace que los eventos grandes no sean tan improbables como lo serían si fueran puramente casuales (o eventos aleatorios).

Como argumenta, entre otros, Clauset (2018), la llamada "larga paz" del periodo posterior a la Segunda Guerra Mundial no es estadísticamente significativa como cambio en las tendencias pasadas. Clauset llegó a la conclusión de que una guerra del mismo tamaño que la Segunda Guerra Mundial tiene una probabilidad de más del 40% de producirse en los próximos 100 años, mientras que una guerra con mil millones de muertos en batalla y, presumiblemente, el exterminio de la mayor parte de la humanidad, tiene un tiempo medio de espera de poco más de 1.000 años. Es decir, es casi seguro, teniendo en cuenta que los seres humanos llevan más tiempo haciendo la guerra entre ellos.

FIGURA 20
TOTAL DE VÍCTIMAS MORTALES DE GUERRA EN EL MUNDO, NORMALIZADAS CON RESPECTO A LA POBLACIÓN MUNDIAL



Fuente: Martelloni, Di Patti y Bardi (2018).

De ahí se deduce que las guerras, al parecer, son fenómenos emergentes en el complejo sistema social formado por los grupos humanos. En otras palabras, no es la voluntad de gobernantes locos la que genera las guerras, sino algún tipo de fuerza colectiva que surge de una red social como resultado de retroalimentaciones que se refuerzan. La guerra parece ser una consecuencia inevitable del comportamiento de los seres humanos, quizá resultado de nuestra ascendencia de primates (Martelloni, Di Patti y Bardi, 2018; De Waal, 2000). Es notable cómo este análisis cuantitativo valida las intuiciones que León Tolstói propuso hace siglo y medio.

Por supuesto, he dicho más de una vez en este libro que predecir el futuro extrapolando las tendencias del pasado es peligroso y poco fiable. Sin embargo, los resultados que encontramos a lo largo de 600 años de historia son aleccionadores: si nada cambia en el comportamiento de la humanidad o en la estructura de la sociedad, la probabilidad de que se produzcan guerras importantes en un futuro próximo es alta. Y no estamos extrapolando nada si nos limitamos a observar las tendencias actuales: ahora mismo hay guerras y el comportamiento de las "grandes potencias" parece ser cada vez más agresivo y temerario en una situación que recuerda cada vez más a lo que precedió a la Primera Guerra Mundial. En aquella época, es probable que ninguno de los dirigentes tuviera idea de las consecuencias de sus decisiones. Se decía que la Primera Guerra Mundial iba a ser la guerra que acabaría con todas las guerras pero, juzgada en retrospectiva, esa afirmación parecía un poco optimista. Y sin embargo, el mismo concepto, la guerra que iba a acabar con todas las guerras, se repitió tan recientemente como con la invasión de Irak en 2003.

¿Hay alguna manera de detener las guerras en el futuro? No faltan ideas al respecto y puede ser interesante citar aquí el libro de David Wilkinson, Dea*dly Quarrels (19*80):

> La forma más habitual de contribuir al debate sobre la causalidad de la guerra y la estrategia de paz ha sido sostener alguna teoría definida, mostrar cómo se ajusta a las circunstancias actuales y deducir conclusiones prácticas inmediatas. Si seguimos este debate público, podemos esperar que nos digan que la guerra es consecuencia, por ejemplo, de la maldad, la alienación, los regímenes agresivos, el imperialismo, la pobreza, el militarismo, la anarquía o la debilidad. Rara vez se ofrecen pruebas. En su lugar, es probable que el escritor presente una estrategia de paz que coincida con su teoría de la causalidad de la guerra. Por lo tanto, aprenderemos que podemos tener:

- La paz a través de la moral. La paz (local y global) puede lograrse mediante un llamamiento moral, a través de la opinión pública mundial, a los líderes y a los pueblos para que no aprueben ni practiquen la violencia, la agresión o la guerra, sino que las eviten y las denuncien.
- La paz a través del derecho. La paz puede conseguirse firmando tratados internacionales y creando leyes internacionales que regulen la conducta y recurriendo a los tribunales internacionales para resolver los conflictos.
- La paz a través de la negociación. La paz puede mantenerse mediante la discusión franca de las diferencias, mediante la diplomacia abierta, mediante conferencias y asambleas internacionales que aireen las quejas y, mediante la franqueza y la buena voluntad, lleguen a un consenso armonioso.
- La paz a través de la reforma política. La paz puede establecerse estableciendo regímenes de tipo no agresivo en todo el mundo: repúblicas en lugar de monarquías; repúblicas democráticas en lugar de oligárquicas; regímenes constitucionalmente limitados en lugar de arbitrarios y autocráticos.
- La paz a través de la liberación nacional. La paz solo puede instituirse mediante el triunfo mundial del nacionalismo. Los imperios multinacionales deben ser disueltos en Estados-nación; cada nación debe tener su propio Gobierno soberano e independiente y todo su territorio nacional, pero no más.
- La paz a través de la prosperidad. La paz requiere el triunfo mundial de un orden económico que produzca prosperidad universal y elimine así el incentivo de la lucha. Algunos consideran que este orden es el del capitalismo universal, o al menos el del libre comercio mundial; otros sostienen que es alguna especie de socialismo, reformista o revolucionario, elitista o democrático.
- La paz a través del desarme. La paz puede establecerse reduciendo y eventualmente eliminando las armas, las bases y los ejércitos, eliminando los medios para hacer la guerra.
- La paz a través de la organización internacional. La paz puede establecerse mediante la creación de una organización política mundial, tal vez incluso un Gobierno mundial constitucional parecido a los Gobiernos nacionales, para imponer el orden y promover el progreso en todo el mundo.
- La paz a través del poder. La paz puede mantenerse mediante la acumulación pacífica de fuerzas, tal vez abrumadoras, tal vez preponderantes o equilibradas o adecuadas, suficientes para disuadir, derrotar o castigar la agresión.

Está claro que no vamos a ninguna parte si manejamos nueve teorías diferentes e incompatibles sobre cómo establecer la paz. ¿Significa eso que tenemos que vivir con la guerra? Es posible que cada uno de nosotros tenga que adaptarse a la idea de que en un futuro no muy lejano nuestra ciudad pueda verse fulminada en una explosión nuclear o que a ti o a tu hijo se os pida que carguéis contra un nido de ametralladoras armados solo con una bayoneta y todo eso, de nuevo, en nombre de la guerra que pondrá fin a todas las guerras.

Si la guerra es un fenómeno colectivo que ocurre a nivel de los Estados y Gobiernos, entonces no hay nada que puedas hacer para evitarla, individualmente o como grupo. Es un escaso consuelo saber que el universo funciona así.

Tal vez lo mejor que podemos hacer, en este punto, es reportar el consejo de un filósofo estoico, contemporáneo de Séneca, Epicteto, quien en su Enc*hiridion (“E*l Manual”) escribió que:

> Algunas cosas están bajo nuestro control y otras no. Las cosas que están bajo nuestro control son la opinión, la búsqueda, el deseo, la aversión y, en una palabra, lo que son nuestras propias acciones. Las cosas que no están bajo nuestro control son el cuerpo, la propiedad, la reputación, el mando y, en una palabra, cualquier cosa que no sean nuestras acciones. Las cosas que están bajo nuestro control son por naturaleza libres, sin restricciones, sin obstáculos; pero las que no están bajo nuestro control son débiles, serviles, restringidas, pertenecientes a otros. Recuerda, pues, que si supones que las cosas que son serviles por naturaleza son también libres, y que lo que pertenece a otros es tuyo, entonces te verás obstaculizado. Te lamentarás, te molestarás, y buscarás culpables tanto en los dioses como en los hombres. Pero si supones que solo es tuyo lo que es tuyo, y que lo que es de los demás es lo que realmente es, entonces nadie te obligará ni te frenará. Además, no culparás a nadie ni acusarás a nadie. No harás nada en contra de tu voluntad. Nadie te hará daño, no tendrás enemigos y no serás dañado.

HAMBRUNAS, EPIDEMIAS Y DESPOBLACIÓN: EL APOCALIPSIS ZOMBI

En 1968, George Romero dirigió una película en blanco y negro de bajo coste titulada La *noche de los muertos vivientes. Fue* un gran éxito que pronto se convirtió en un culto. Evidentemente, la película caló hondo en la psique humana con su tema de los muertos que se levantan de sus tumbas para devorar a los vivos. El crítico de cine Roger Ebert escribió sobre ella: "Sentí verdadero terror en ese cine de barrio el pasado sábado por la tarde" (Ebert, 2004) y yo tengo el recuerdo personal de haber visto a gente vomitando en el vestíbulo del cine después de haber visto la película.

El término "zombi" no se utilizó en la película de Romero, pero fue el inicio del género que hoy llamamos "apocalipsis zombi", tramas que implican a un gran número de "no muertos" que rondan por ciudades y suburbios en busca de humanos vivos a los que matar y comer. Pero ¿por qué esta fascinación por los zombis en nuestros tiempos? ¿Cómo es que hemos creado un género que

nunca antes había existido en la historia de la literatura humana? Se imaginan a Homero contándonos que la ciudad de Troya estaba asediada por zombis? ¿Dante Alighieri encontró zombis en su visita al infierno? ¿Y que Shakespeare nos cuente que Enrique V luchó contra zombis en Agincourt?

Si algo existe, tiene que haber una razón para que exista y creo que hay una razón por la que el tema de los zombis es tan popular en nuestros tiempos. La literatura siempre refleja los miedos y las esperanzas de la cultura que la creó; a veces, de forma muy indirecta y simbólica. Y en este caso, es muy posible que los zombis reflejen un miedo no expresado presente sobre todo en nuestro subconsciente: la *inanición*.

*E*mpecemos con una característica típica de los zombis: los círculos negros alrededor de los ojos. Se supone que los zombis son cadáveres que de alguna manera mantienen una apariencia de vida. ¿Pero los cadáveres tienen este tipo de ojos? Tal vez, pero el edema facial que crea el efecto de las cuencas oculares oscuras también es típico de las personas desnutridas. Si se observa cómo los artistas dibujaron a los hambrientos irlandeses durante la Gran Hambruna que comenzó en 1845, percibieron claramente este detalle. En una imagen bastante conocida de Bridget O'Donnell, una de las víctimas de la Gran Hambruna irlandesa, se notan las cuencas oscuras de sus ojos. Sus hijos también tienen el mismo círculo oscuro alrededor de los mismos. Por supuesto, comparar a los hambrientos irlandeses con zombis no implica una falta de respeto por los hombres y mujeres irlandeses que perecieron en una de las mayores tragedias de los tiempos modernos, pero nos dice algo sobre cómo se percibe a los hambrientos en nuestro imaginario colectivo. Los zombis parecen ser la imagen perfecta del efecto de la hambruna, no solo en cuanto a su aspecto demacrado, sino también en cuanto a su comportamiento.

Ahora, imagina que ocurre algo que detiene el suministro de alimentos en los pasillos de tu supermercado local. Imagina que ocurre en todos los supermercados de tu región: quizás una escasez de combustible, quizás una guerra, quizás algo más, en cualquier caso, es algo que podría ocurrir (Friedemann, 2016). Los habitantes de las zonas suburbanas se sorprenderían primero, se enfadarían después, se desesperarían y, finalmente, se morirían de hambre cuando se agotaran sus reservas de alimentos. Incluso antes de eso, se habrían quedado sin gasolina para sus coches, el único sistema de transporte del que disponían.

A menos que el Gobierno pudiera (y quisiera) intervenir, los habitantes de los suburbios pronto se convertirían en personas esqueléticas, torpes y hambrientas que rondarían el barrio y los centros comerciales a la búsqueda desesperada de algo que comer. Cuando se les acabase la comida enlatada, algunos podrían recurrir al canibalismo, como hacen los zombis en las películas. Otros podrían hacerse con una buena provisión de armas y munición y así jugar a ser el rey de la colina durante un tiempo, robando la mayor parte de la comida restante a los que la acaparasen y matando a tiros a los pobres desgraciados que aún anduvieran por las calles, un tropo más de las películas de zombis. La vieja máxima latina mor*s tua, vita mea se* convertiría en la regla. En lo que respecta a los colapsos de Séneca, este caso se encuentra entre los peores posibles.

Por supuesto, esto no es una predicción y podemos esperar que nunca ocurra nada parecido, pero no se puede descartar como algo imposible. No soy el único que ha señalado este punto, Terrence Rafferty escribió en 2011 una crítica literaria en The *New York Times en* la que decía que:

> […] es un poco inquietante pensar que estas criaturas no humanas, con sus fauces flojas y abiertas, podrían servir como metáforas de personas reales —inmigrantes indocumentados, por ejemplo, o poblaciones enteras de países en desarrollo— cuya única ofensa, en la mayoría de los casos, es que sus bocas y vientres exigen ser llenados.

Las catástrofes ficticias ("¡solo es una película!") son seguramente menos amenazantes que las que se describen como probables en la realidad. Es un rasgo curioso de la mente humana, pero puede ser que la única forma que tiene nuestra mente de hacer frente a las posibles catástrofes que se avecinan sea verlas como cuentos de hadas. Pero ¿cuáles son las probabilidades de que una gran hambruna real afecte al mundo de nuestro tiempo?

La opinión general sobre este punto parece ser que las hambrunas son cosa del pasado. Probablemente conozcáis la historia de las predicciones erróneas realizadas por Paul Ehrlich en su libro de 1968 La *bomba demográfica, e*n el que escribió que "en la década de 1970 cientos de millones de personas morirán de hambre". Supone otro ejemplo de cómo el secreto para hacer predicciones erróneas consiste en extrapolar las tendencias actuales. De hecho, en las décadas de 1950 y 1960 se produjeron varias grandes hambrunas, como la Gran Hambruna China de 1959-1961 que causó al menos 15 millones de muertos. Así pues, la idea de que las hambrunas eran habituales y que

continuarían en el futuro constituía una percepción común en la década de 1960. Puede que no sea una coincidencia que el libro de Ehrlich y la película de zombis de George Romero aparecieran el mismo año.

Por otra parte, si Ehrlich hizo una predicción equivocada en términos de tiempo, eso no significa que estuviera equivocado en términos de contenido. Si hubiera enmarcado sus puntos de vista en un escenario en lugar de en una predicción, entonces no sería tan fácil mofarse de él, algo que parece haberse convertido en un pasatiempo popular. Así que, recordando siempre que el futuro nunca es como el pasado, ¿qué podemos decir sobre la posibilidad de que las grandes hambrunas puedan provocar un colapso local —o incluso global — de la población humana?

Sabemos que en la actualidad hay más de 7.500 millones de personas vivas en la Tierra. Evidentemente, si están vivas, significa que se producen suficientes alimentos para mantenerlas vivas, pero eso, por supuesto, no significa que haya comida abundante para todos. Muchas personas de los países pobres están desnutridas, mientras que en los países ricos, otras muchas sufren el problema contrario: la obesidad. En realidad, puede tratarse de otra forma de desnutrición: se sabe que los pobres comen más "comida basura" que los ricos y que también tienen más sobrepeso por término medio (Darmon y Drewnowski, 2008). Una interpretación común es que la dieta de los pobres en los países ricos carece de verduras, pescado y fruta, por lo que no puede aportar las vitaminas y micronutrientes necesarios para una buena salud. Intentan compensarlo comiendo demasiado, sobre todo en lo que respecta a los carbohidratos. Aunque la relación directa entre el azúcar y la obesidad es controvertida (Stanhope, 2016), esta interpretación puede explicar muchos rasgos de la actual epidemia de obesidad en Occidente, un problema sistémico a gran escala (Lee, 2017). Sin duda, no es algo que pueda explicarse simplemente asumiendo que los occidentales son demasiado ricos.

Pero también es cierto que en ningún lugar del mundo vemos hoy en día el tipo de hambrunas que se producían hace décadas, con personas hambrientas que se tambaleaban y parecían zombis antes de caer muertas en las aceras. El parón en las hambrunas lo reflejan claramente los datos históricos del último siglo aproximadamente (Hasell y Roser, 2018): hubo un máximo de muertes relacionadas con la hambruna en la década de 1940, con más de 18 millones de muertes durante la misma. En comparación, la década de los ochenta tuvo algo más de 1,3 millones de muertes. En el siglo XXI se produjo un cierto aumento,

con más de 2,8 millones de muertes durante la primera década del año 2000, todavía muy por debajo de los máximos registrados históricamente. No son cifras despreciables, pero indican una mejora. Evidentemente, el sistema mundial de producción de alimentos ha podido hacer frente al aumento de la población mundial, al menos hasta ahora. A todas luces, ha sido un logro notable (figura 21).

FIGURA 21
MORTALIDAD POR HAMBRE EN EL MUNDO



Fuente: Fundación Mundial de la Paz (2015).

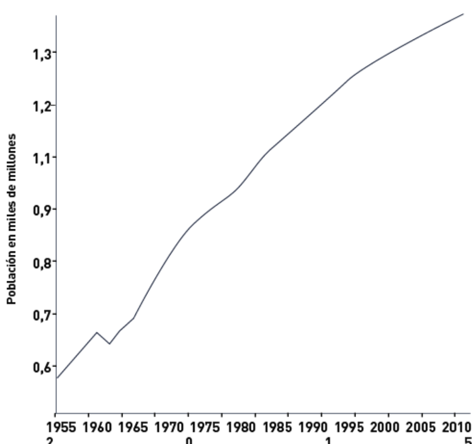
La disminución de las hambrunas se atribuye normalmente a factores tecnológicos. Los fertilizantes, los pesticidas y la mecanización aumentaron enormemente el rendimiento de la producción por unidad de superficie, creando lo que hoy llamamos la "revolución verde". El término da la impresión de una mejora tecnológica repentina, pero no es así: los rendimientos mejoraron gradualmente como resultado de la innovación progresiva en las técnicas de cultivo. Pero, además, la desaparición de la hambruna se debió a que los barcos contenedores y los camiones de bajo coste hicieron posible el transporte de alimentos a cualquier parte del mundo. A su vez, estos barcos no habrían transportado alimentos si no se hubieran tomado medidas políticas y de mercado. Después de la Segunda Guerra Mundial, el suministro de alimentos a la población de los países pobres se vio como una forma de evitar la difusión del comunismo y también como una forma sencilla de subvencionar la sobreproducción de la agricultura occidental (Mousseau, 2005). Ese fue uno de los factores que generó el sistema económico y político que llamamos "globalización". Como el mundo se ha convertido en un único y gigantesco mercado, cualquiera puede utilizar dólares para comprar alimentos

de cualquier lugar y hacer que se los entreguen donde vive. Como los alimentos son tan baratos y como su compra suele estar subvencionada, el resultado ha sido una distribución capilar de alimentos por todas partes. Paul Ehrlich no había comprendido la importancia de estos factores cuando predijo que cientos de millones de personas morirían de hambre. No lo han hecho. Al menos, todavía no.

El problema es que si hoy hay alimentos suficientes para 7.500 millones de personas, eso no significa que los haya en el futuro. Es otro caso de la regla principal de la predicción: el futuro nunca es como el pasado. Por lo tanto, se cometería el mismo tipo de error que cometió Ehrlich si se extrapolara la situación actual y de ahí se concluyera que no habrá más hambrunas en el mundo. La destrucción de los suelos fértiles, el agotamiento de los acuíferos, el aumento de la dependencia de los fertilizantes minerales agotables, por no hablar del cambio climático, son todos factores que pueden hacer que el futuro del suministro de alimentos sea mucho más difícil de lo que es hoy en día para la humanidad. Los problemas se agravarán si la población sigue creciendo.

Obsérvese también que el sistema mundial de suministro de alimentos es un sistema complejo que vincula factores tecnológicos, económicos y políticos. Como hemos visto en este libro, estos sistemas están sujetos al tipo de caída brusca que llamamos "precipicio de Séneca". El lento crecimiento del sistema te apacigua con una falsa sensación de seguridad hasta que te encuentras cayendo por el precipicio. Así, las hambrunas suelen ir acompañadas de epidemias y guerras. Una población desnutrida es presa fácil de los microbios en diversas formas; en la Antigüedad, las hambrunas y las plagas iban de la mano o se sucedían. Además, el estrés generado por las hambrunas puede generar tensiones políticas que, a su vez, generan violencia. A la inversa, las guerras pueden generar hambrunas, a veces provocadas intencionadamente por un bando para debilitar al otro. Se trata siempre del mismo mecanismo que he bautizado como "crisis de Séneca": todos los factores negativos se alían para hacer caer el sistema. He aquí algunos ejemplos de colapsos poblacionales relacionados con la hambruna que tuvieron lugar en el pasado. En primer lugar, aquí están los datos de la Gran Hambruna China de 1959 a 1960 (Hasell y Roser, 2018) (figura 22).

FIG**URA 22**
DATOS DEMOGRÁFICOS DE CHINA

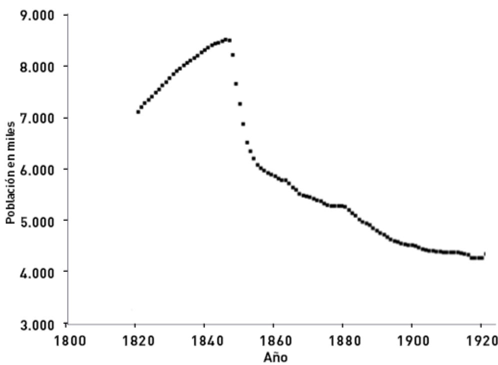


Fuente: Our World in Data.

En términos numéricos, con 15 millones de muertes atribuibles directa o indirectamente a la falta de alimentos, fue una de las mayores tragedias generadas por hambruna del registro histórico. Sin embargo, nótese que estos 15 millones de víctimas solo causaron una mella apenas perceptible en la población china, alrededor del 2% del número total, en aquel momento cercano a los 700 millones de personas. El número de nacimientos se recuperó pocos años después de la fase de hambruna y, en la práctica, la trayectoria del crecimiento de la población china no se vio afectada de forma significativa por el suceso.

En cambio, aquí se muestra un gráfico de las víctimas de la hambruna irlandesa de 1845 a 1849. La rápida caída de la población no fue causada solo por el hambre y las enfermedades asociadas, sino también por la emigración, pero incluso esta fue una consecuencia de la falta de alimentos. La pérdida de unos dos millones de personas en pocos años, aproximadamente una cuarta parte de la población total, no fue solo una tragedia humana, sino un desastre social y cultural que llevó a Irlanda, entre otras cosas, a perder su lengua nacional, el gaélico, para ser sustituida por el inglés (figura 23).

FIGURA 23
POBLACIÓN DE IRLANDA



Fuente: Base de datos Maddison Historical Statistics.

Por último, un tercer ejemplo en el que vemos ambos fenómenos en juego en el mismo país, una pérdida transitoria de población y otra duradera: Ucrania (figura 24).

Los datos son incompletos, pero muestran claramente dos fases de disminución de la población en Ucrania. La primera corresponde a la Gran Hambruna de 1932 a 1933, que afectó no solo a Ucrania, sino a amplias zonas de la Unión Soviética. Fue una hambruna trágica con unos 2 millones de muertos solo en Ucrania, quizás más. Pero, por muy trágica que fuera, se trata de una etapa transitoria en la curva de crecimiento de la población. Es posible que la población ucraniana sufriera otra fase de declive durante la Segunda Guerra Mundial, pero faltan los datos. En cualquier caso, en la década de 1950, la población había repuntado y la fase de crecimiento que la siguió duró hasta que Ucrania alcanzó su máximo de población, unos 53 millones, alrededor de 1990. Luego, con la caída de la Unión Soviética, en 1991, comenzó el declive, que permanece hasta hoy. Este declive no fue causado por hambrunas, al menos no del tipo que lleva a la gente a morir de hambre. Pero es probable que la calidad de la nutrición disminuyera junto con la calidad de la atención sanitaria, lo que aumentó la tasa de mortalidad, especialmente entre los ancianos. Al mismo tiempo, en Ucrania se redujo la tasa de natalidad, al igual que en la mayoría de los países que antes formaban parte de la Unión Soviética. No podemos decir si el declive que se está produciendo es irreversible, pero es posible que acabe siéndolo.

FIGURA 24
POBLACIÓN DE UCRANIA, INCLUIDO EL EFECTO DE LA GRAN HAMBRUNA DE LA DÉCADA DE 1930



Fuente: Wikipedia.

Estos son solo ejemplos de hambrunas modernas, que representan un fenómeno que ha sido común en la historia. Las hambrunas ocurren: a veces son fenómenos transitorios generados por alguna catástrofe natural, como sequías prolongadas, agravadas por la mala gestión de Gobiernos corruptos o incompetentes, o ambas cosas. A veces son tendencias sistémicas causadas por la población que supera los límites de lo que la agricultura local puede sostener. Este límite no constituye algo fijo, sino que puede ser superado por mejores tecnologías agrícolas y por factores sociales y económicos que favorezcan una mejor distribución de los alimentos. El límite también puede disminuir como resultado del agotamiento del recurso clave para la agricultura: el suelo fértil destruido por la sobreexplotación. Sea como fuere, en algunos ejemplos históricos está claro que se ha superado algún límite: países como Irlanda en 1845 y Ucrania en 1991 fueron sencillamente incapaces de mantener el nivel de población que habían alcanzado. La vuelta a los límites sostenibles tomó la forma de una catástrofe apocalíptica en Irlanda, donde la infraestructura de transporte y financiera subdesarrollada del país hizo imposible compensar el colapso de la producción agrícola en las regiones del sureste. En Ucrania fue menos dramático, pero, aun así, supuso un acontecimiento importante. El caso de Ucrania, así como el de varios países exsoviéticos, demuestra que no es necesario ver a la gente caer muerta en las calles para que la población disminuya. Al parecer, los jóvenes tienden a pensar que sus hijos tendrán pocas oportunidades en un sistema económicamente decadente y tienden a limitar su progenie. Los mayores, entonces, tienen que hacer frente a la mala alimentación y a la falta de atención sanitaria: puede que eso no les mate de inmediato, pero seguro que

disminuye su esperanza de vida. Un efecto similar se está produciendo en la mayoría de los países de Europa Occidental en cuanto a tasas de natalidad más bajas, pero la esperanza de vida sigue siendo alta y la reducción de la población nacional se compensa con la inmigración.

Una interpretación de las hambrunas que se discute a menudo es que algunas de ellas son "provocadas por el hombre", es decir, que son el resultado de acciones malvadas específicas llevadas a cabo por los Gobiernos y diseñadas para matar de hambre a la gente. El caso más conocido es el de la hambruna irlandesa de mediados del siglo XIX, de la que se dice que fue un crimen perpetrado por el malvado Gobierno británico contra sus súbditos irlandeses, pero esta acusación se escucha para otras hambrunas modernas. Se culpa al Gobierno soviético de la hambruna de 1932 en Ucrania y al Gobierno chino de la hambruna china de 1959. Ahora bien, es cierto que los Gobiernos no son asociaciones benévolas, sino que suelen estar entre las organizaciones más mortíferas jamás creadas por la humanidad. Según Rudolph Rummel, a lo largo del siglo XX, unos 256 millones de personas fueron exterminadas, directa o indirectamente, por acciones gubernamentales en lo que Rummel denomina "democidios", término que incluye no solo a las víctimas de las guerras regulares, sino también otro tipo de acciones destinadas, por ejemplo, a matar de hambre a las personas.

En general, sin embargo, parece que los Gobiernos rara vez están interesados en matar a sus propios ciudadanos: los necesitan como contribuyentes o carne de cañón. Al contrario, a menudo intentan multiplicarlos: fomentar la natalidad es una política tradicional de las dictaduras. Pero los Gobiernos sí se dedican a exterminar a las minorías, personas identificadas y que pueden ser calificadas de enemigas por su raza, lengua, religión e ideología. Para ello, suelen utilizar armas convencionales: el problema de las hambrunas como armas para la limpieza étnica es que no se puede distinguir fácilmente a los amigos de los enemigos a menos que la población a exterminar esté localizada en una región geográfica específica.

Por lo que puedo decir sobre este asunto, no veo ninguna prueba de que el Gobierno británico actuara voluntariamente para crear o empeorar la hambruna irlandesa de 1845. No tenían ningún interés en matar a una población que les proporcionaba ingresos, pero es cierto que fueron lentos e ineficaces y a veces sus acciones empeoraron la situación. No es de extrañar, ya que otra característica bien conocida de los Gobiernos es que no saben

gestionar sistemas complejos. Otros casos son menos claros pero, personalmente, tiendo a pensar que la incompetencia es normalmente una mejor explicación que la mala intención para las grandes hambrunas de la historia.

¿Y el futuro? ¿Veremos nuevamente grandes hambrunas en el mundo? Una pregunta que se oye habitualmente sobre este punto es "¿cuánta gente puede soportar la Tierra?". Se trata de una pregunta mal planteada por varias razones. Debería ser, más bien, "¿cuántas personas puede mantener la Tierra ind*efinidamente?"*. Es una obviedad que la Tierra puede mantener a casi 8.000 millones de personas: lo está haciendo. Pero eso se hace en gran parte mediante la "explotación" de un recurso no renovable: el suelo fértil. Así que la gran población humana que vive hoy en la Tierra puede ser solo un fenómeno transitorio, muy por encima de la capacidad de carga del planeta.

A menudo, hoy en día, oímos hablar del número de "Tierras" que necesitaríamos para proporcionar durante mucho tiempo la cantidad de recursos que estamos consumiendo hoy. Se trata de un concepto relacionado con el de la "huella ecológica" propuesto por Wackernagel (1999). Utilizando el concepto de huella, podemos calcular que, hoy en día, estamos utilizando casi dos Tierras, y si todo el mundo viviera al mismo nivel de consumo de recursos naturales que Estados Unidos, entonces necesitaríamos algo así como cinco planetas similares a la Tierra. Eso puede obligarnos a "volver" a niveles muy por debajo de los límites de sostenibilidad, lo cual puede resultar algo incómodo para la mayoría de nosotros.

Pero hay una razón más profunda por la que la cuestión del límite de población es una cuestión mal planteada. Se debe a que las hambrunas y las epidemias relacionadas con ellas en la historia siempre han estado localizadas en regiones específicas del mundo. Cuando se produce una catástrofe, es difícil que una población hambrienta y enferma se desplace lejos en busca de alimentos. En Irlanda, por ejemplo, la gente no tenía más medios de transporte que sus pies y la mayoría de las víctimas de la hambruna murieron cerca de sus pueblos. En los tiempos modernos, es mucho más fácil transportar los alimentos donde se necesitan que transportar a las personas donde hay alimentos disponibles. Mientras el sistema económico que llamamos "globalización" siga activo, esta capacidad proporciona una notable resiliencia al sistema de producción y distribución de alimentos. Pero las cosas

pueden cambiar con la actual tendencia de construir muros para marcar las fronteras estatales, lo que limita aún más la movilidad de los pobres y proporciona una barrera contra la posibilidad de que las masas de personas hambrientas inunden las regiones más ricas. Esto puede dar lugar a que grandes regiones del mundo sufran hambrunas desastrosas, mientras que otras se las arreglen para mantener un suministro suficiente de alimentos. No sería nada diferente de la situación anterior a la globalización, cuando las hambrunas eran una característica normal de la vida, en todas partes.

En general, las hambrunas pueden ser una de las amenazas más claramente percibidas en la actualidad, aunque es una percepción que rara vez se expresa abiertamente. Como individuos, es posible que queramos prepararnos para afrontar una gran hambruna almacenando provisiones en los sótanos de nuestras casas o acumulando armas y municiones para robar las provisiones de nuestros vecinos. Es dudoso (como mínimo) que estas estrategias sean efectivas. Si se produce una gran hambruna, la supervivencia solo será posible actuando juntos como sociedad. Está por ver si esto sería posible en el mundo que llamamos Occidente, que pone tanto énfasis en la responsabilidad individual.

EL GRAN MOMENTO: EL COLAPSO DE LA SOCIEDAD

En 1992, recibí un correo electrónico de Rusia. Escrito en muy buen inglés, contenía buenos deseos por mi cumpleaños y una propuesta de colaboración en investigación. Venía de un instituto de investigación de Moscú donde algunos físicos rusos trabajaban en el campo de la ciencia en el que yo trabajaba en ese momento, la ciencia de la superficie. Como la Unión Soviética había desaparecido apenas un año antes, buscaban contactos y colaboraciones internacionales. Sin un salario y sin financiación para sus investigaciones, los investigadores de los antiguos países soviéticos se veían obligados a buscar trabajo como conserjes, empleados de oficina o traductores, mientras que muchos de ellos tuvieron que abandonar Europa del Este para continuar su carrera en Occidente. Ese fue el comienzo de mi relación con los antiguos investigadores e instituciones de investigación soviéticas, especialmente en Rusia y Ucrania.

Ser testigo de los efectos del colapso soviético desde dentro fue una

experiencia aleccionadora y me hizo preguntarme sobre las razones que habían hecho caer a la Unión Soviética. En aquel momento, me inclinaba por la explicación generalmente aceptada que Francis Fukuyama (1992) había denominado el "fin de la historia". Según esta opinión, la caída se debió a la ineficacia del Estado soviético y demostró la superioridad del sistema político occidental.

Pero cuanto más comprendía a Rusia, más dudaba de esta interpretación optimista. Con todos sus defectos, sus peculiaridades, su inclinación ideológica, su exagerada burocracia y sus muchos más problemas, la Unión Soviética seguía siendo un Estado que abarcaba una gran parte de Eurasia y casi 300 millones de personas. Sus logros científicos habían sido notables e incluían el primer satélite artificial, el primer hombre en el espacio y el serio desafío a Occidente en la carrera a la Luna de la década de 1960. Por no hablar de haber frustrado la invasión alemana durante la Segunda Guerra Mundial con una pérdida de más de 20 millones de soldados. Si alguna vez has cogido un tren del metro de Moscú y has visto las estaciones elaboradamente decoradas, no se puede pasar por alto el hecho de que la Unión Soviética ha sido mucho más que una simple dictadura mantenida por su policía secreta. Y aunque el trabajo de investigación de los científicos soviéticos era en su mayoría desconocido para sus homólogos occidentales, a menudo estaba al mismo nivel, si no mejor.

Lo que más me impresionó fue la resiliencia del pueblo ruso. Todavía recuerdo una escena que presencié en los años noventa, probablemente en el momento más oscuro de la crisis económica en Rusia. En aquella época, la moneda local, el rublo, había perdido casi todo su valor y la mayoría de las transacciones se hacían en dólares, incluso para artículos corrientes como la comida en los supermercados. Así que, a la salida de una estación de tren de Moscú, vi a una docena de rusos, hombres y mujeres, alineados a lo largo de toda la acera, cada uno llevaba algo en las manos: una camisa, un par de zapatos, un sombrero u otros artículos de uso cotidiano. Vendían lo que tenían por unos pocos rublos. Al principio, pensé que lo hacían por desesperación, pero luego lo pensé mejor: estas personas no estaban desesperadas, sino que estaban haciendo una declaración, estaban compartiendo lo que tenían con los demás y, al hacerlo, estaban diciendo que los rublos seguían siendo dinero y que Rusia seguía siendo un país independiente con su moneda nacional. El tiempo les dio la razón: con el paso de los años, Rusia volvió a utilizar rublos y

la economía repuntó hasta alcanzar un grado de prosperidad razonable. Muchas instituciones científicas de Rusia y de la antigua Unión Soviética han vuelto a su anterior nivel de excelencia y me alegro de haber podido echar una mano en la tarea, aunque, por supuesto, el mérito es enteramente de la obstinación, la persistencia y el duro trabajo de los investigadores rusos.

Mi experiencia con el colapso ruso fue paralela a la de Dmitry Orlov, un estadounidense de origen ruso que también experimentó personalmente los efectos del colapso de la Unión Soviética. Orlov relató su experiencia y sus ideas en una serie de libros, el primero de ellos (2011) con el título Rei*nventando el colapso. El ejemplo soviético y las perspectivas americanas. E*ste título, creo, explica de qué trata el libro. Orlov tiene el ruso como lengua materna y su conocimiento de la sociedad rusa es obviamente mucho mejor que el mío, pero su experiencia coincide en gran medida con la mía. El colapso de la Unión Soviética no fue una simple cuestión de ideología equivocada: se debió a razones profundas que habían debilitado a la sociedad soviética desde dentro haciéndola seguir una trayectoria que la llevó inevitablemente a la decadencia y a la desaparición. Según Orlov, los mismos factores están actuando para llevar a la sociedad occidental a un futuro colapso inevitable.

Creo que si Tolstói hubiera sido testigo del colapso de la Unión Soviética, lo habría interpretado de la misma manera que interpretó la invasión de Rusia por los ejércitos de Napoleón. "Sucedió porque tenía que suceder". No ocurrió, ni podía ocurrir, porque algún líder engreído hubiera tomado una decisión. En otras palabras, poco o nada tuvo que ver con la historia, tantas veces escuchada, de que Ronald Reagan, Margaret Thatcher y el rey Fahd de Arabia Saudí juntos habían conseguido hacer bajar los precios del petróleo para disminuir los ingresos que el Estado soviético obtenía de la exportación de petróleo y hacerlo colapsar. El colapso de la Unión Soviética tuvo mucho que ver con el crudo, pero ciertamente no en términos de teoría de la conspiración. Tampoco la caída pudo ser causada únicamente por el líder soviético de la época, "Mad Misha" Gorbachov, que fuera tan ingenuo como para dejarse engañar fácilmente por las promesas de los malvados líderes occidentales.

La Unión Soviética se hundió y desapareció de la historia como un ejemplo más de cómo se derrumban Estados, imperios y civilizaciones enteras. Hasta ahora, ninguna civilización humana ha sobrevivido a este destino, ninguna ha

durado más de unos pocos miles de años sin sufrir al menos algún tipo de colapso, quizá resurgiendo más fuerte después, pero también profundamente cambiada. Algunas civilizaciones fueron destrozadas por acontecimientos externos: la minoica, a orillas del mar Mediterráneo, fue probablemente destruida por la megaerupción del volcán Thera a mediados del segundo milenio antes de Cristo. Algunas civilizaciones fueron destruidas por el poder militar de otras tecnológicamente más avanzadas, como los imperios azteca e inca, destruidos por los ejércitos españoles durante el siglo XVI de nuestra era. Pero en la gran mayoría de los casos conocidos en la historia, las civilizaciones y los imperios cayeron por sí mismos o, si fueron derrotados por potencias extranjeras, fue porque habían quedado muy debilitados por razones internas. Entre 1934 y 1961, el historiador británico Arnold Toynbee (1889-1975) escribió Un *estudio de historia que* describe el ascenso y la caída de las 23 civilizaciones que había estudiado. Su conclusión fue que "las civilizaciones mueren por suicidio, no por asesinato". Había identificado una característica típica de los sistemas complejos, que tienden al colapso debido al mecanismo, a veces mortal, de las retroalimentaciones de refuerzo. Ese fue ciertamente el caso de la Unión Soviética, que no fue derrotada militarmente ni golpeada por un asteroide: se derrumbó principalmente por razones internas.

El colapso de las civilizaciones es uno de los temas más controvertidos del estudio histórico. Hay, literalmente, cientos de explicaciones diferentes para algunas de las caídas más espectaculares, como en el caso del Imperio romano. Parece que estas explicaciones aparecen y desaparecen en razón de las preocupaciones actuales de nuestra propia civilización. Por ejemplo, el historiador Kyle Harper trasladó recientemente al antiguo Imperio romano una de nuestras mayores preocupaciones: el cambio climático, argumentando que fue al menos una de las principales causas de su caída (Harper, 2017). Esto supone estirar un poco los datos, por no decir otra cosa, ya que estos no muestran evidencia de cambios climáticos significativos en Europa hasta mucho después de que el Imperio romano estuviera agonizando (Buntgen, 2011).

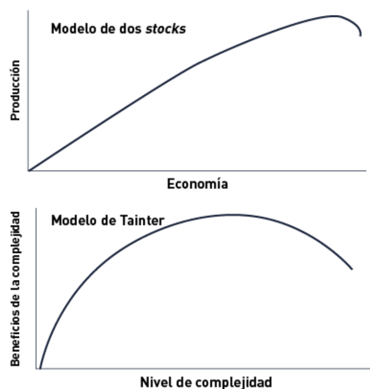
En realidad, los ciclos históricos de los imperios y las civilizaciones indican que tienen que existir mecanismos generalmente válidos que provoquen su caída. En los últimos tiempos, parece estar surgiendo un cierto acuerdo sobre este punto y un pionero en este campo ha sido Joseph Tainter con su idea de los

"rendimientos decrecientes de la complejidad" (1996). Según Tainter, las civilizaciones tienden a expandirse y a medida que lo hacen desarrollan estructuras internas que sirven para hacer frente a las amenazas y los retos externos e internos: el Ejército, el sistema legal, la Policía, la burocracia y muchos otros. La idea de Tainter es que la eficacia de estas estructuras disminuye a medida que crecen. Es decir, se vuelven cada vez menos eficaces para realizar las tareas para las que fueron construidas. Según Tainter, este fenómeno conduce finalmente a rendimientos decrecientes. Este es el mecanismo que hace caer las extraordinarias estructuras que llamamos "civilizaciones" o "imperios".

Las ideas de Tainter están impregnadas de la ciencia de los sistemas complejos, pero son cualitativas. En realidad, Tainter apoya su interpretación con datos arqueológicos e históricos, pero solo de forma indirecta, y una cuestión que sigue sin resolverse es cómo exactamente los rendimientos decrecientes provocan el colapso en lugar de simplemente ralentizar el crecimiento. Recientemente, junto con mis colegas Ilaria Perissi y Sara Falsini, hemos intentado reproducir las ideas de Tainter utilizando un modelo desarrollado con las herramientas de la dinámica de sistemas (Bardi, Falsini y Perissi, 2019). Descubrimos que el concepto básico propuesto por Tainter, los rendimientos decrecientes, puede ser reproducido por el modelo. Pero también descubrimos que no es solo el aumento de tamaño lo que reduce la eficiencia de las estructuras de la sociedad; es el efecto combinado del mayor coste de los recursos naturales y el de tener que luchar contra la contaminación. Cuando se tienen en cuenta estos efectos, el modelo produce una curva de rendimientos decrecientes de la complejidad que es cualitativamente similar a la propuesta por Tainter (figura 25).

FIG**URA 25**

LOS PRINCIPALES RESULTADOS DEL ESTUDIO SOBRE EL COLAPSO DE LAS CIVILIZACIONES REALIZADO POR BARDI, FALSINI Y PERISSI EN 2019 COMPARADOS CON LA CURVA DE TAINTER. EN EL ESTUDIO, ASUMIMOS QUE EL NIVEL DE COMPLEJIDAD DE UNA CIVILIZACIÓN ES PROPORCIONAL AL TAMAÑO DE SU ECONOMÍA



La mayoría de las civilizaciones de la historia parecen surgir de la disponibilidad de algún recurso natural abundante y barato. El Imperio romano creció gracias a la producción de metales preciosos de las minas de oro y plata, en particular las del norte de España. Nuestro actual imperio mundial ha crecido gracias a la disponibilidad de combustibles fósiles abundantes y baratos, primero el carbón y luego —actualmente— el petróleo. Pero hemos visto como los recursos naturales tienden a ser sobreexplotados y también que este fenómeno conduce a su rápido agotamiento y, a menudo, a una rápida caída del sistema: es el mecanismo básico del colapso de Séneca.

La Unión Soviética era un imperio basado principalmente en sus vastos recursos minerales y no pudo escapar al destino de otros imperios basados en lo mismo: el colapso causado por la sobreexplotación. La caída de la Unión Soviética era ampliamente previsible mucho antes de que ocurriera y, de hecho, fue predicha por los propios investigadores soviéticos. A este respecto, Dennis Meadows, uno de los principales autores del estudio de 1972 Los *límites del crecimiento, d*io una charla en Moscú en 2012 en la que contó que los investigadores soviéticos habían aplicado los mismos modelos para estudiar la economía de la Unión Soviética, descubriendo que el sistema se derrumbaría pronto. Publicaron sus resultados en 1980 en un libro (en ruso) titulado La *Unión Soviética y Rusia en el sistema global. S*egún Meadows, en la década de 1980, Viktor Gelovani, primer autor del libro ruso, se dirigió a los gobernantes del país y les dijo: "Mis previsiones muestran que no tenéis ninguna posibilidad. Tenéis que cambiar vuestras políticas". Y el líder dijo: "No, tenemos otra posibilidad: podéis cambiar vuestras previsiones".

La charla de 2012 de Meadows ha desaparecido de la web, pero sus puntos principales están resumidos en uno de mis artículos en el blog Cas*sandra's*

Legacy (Bardi, 2015). Las afirmaciones de Meadows están confirmadas por el trabajo de Eglé Rindzevičiūtė (2015), que escribió un excelente artículo que cuenta toda la historia. Está claro que varios científicos soviéticos conocían muy bien la historia de Los *límites del crecimiento y* sus métodos y resultados, aunque el estudio fue oficialmente rechazado por el Gobierno soviético, ya que era el resultado de la decadente ciencia occidental. Estos científicos rusos comprendieron que los mismos factores que el estudio había considerado para todo el mundo se aplicarían a la Unión Soviética. Parece que hicieron un esfuerzo considerable para advertir a los dirigentes de la Unión de que el sistema iba a colapsar. La reacción de los dirigentes soviéticos fue la misma que en Occidente; tanto los dirigentes soviéticos como los occidentales estaban completamente atados al concepto de "crecimiento a toda costa" y eran refractarios a los cambios. Así que se ignoró la advertencia y, como de costumbre, lo siguiente fue la ruina. Es muy posible que la gota que colmó el vaso soviético fuera el aumento de los costes de producción del petróleo, como sostiene Douglas Reynolds en su libro Col*d War Energy* (2016).

Entonces, ¿qué podemos esperar del futuro? ¿Veremos a la civilización occidental seguir el mismo camino que la antigua Unión Soviética? Es perfectamente posible que muchos de los lectores de este libro experimenten este tipo de futuro. Por eso, puede valer la pena escuchar el pronóstico de alguien que vivió el colapso soviético: Dmitri Orlov. En su libro Las *cinco etapas del colapso* (2013) resume cómo se produce el colapso de una sociedad compleja.

- Etapa 1: colapso financiero.
- Etapa 2: colapso comercial.
- Etapa 3: colapso político.
- Etapa 4: colapso social.
- Etapa 5: colapso cultural.

Es muy posible que ya estemos experimentando las primeras etapas del proceso, principalmente en forma de problemas financieros. El choque financiero de 2008 se remedió de alguna manera con lo que se denominó "flexibilización cuantitativa" (QE, por sus siglas en inglés) y consistió principalmente en la inyección de grandes cantidades de divisas en el sistema.

Parece que funcionó, al menos durante un tiempo, pero muchas economías del mundo no se han recuperado completamente y tal vez nunca lo hagan.

El problema de utilizar herramientas financieras para resolver la crisis es que se puede tener todo el dinero virtual que se quiera, pero la gente no puede comer comida virtual, ni alimentar sus coches y hogares con energía virtual. Este es un problema que ya tuvo la antigua Unión Soviética con el rublo, que poco a poco se convirtió en una moneda sin valor y dio lugar al conocido chiste que decía "ellos fingen pagarnos y nosotros fingimos trabajar para ellos". En nuestro mundo, el dinero en forma de dólares tiene valor aunque sea totalmente virtual mientras se pueda cambiar por petróleo y todos los productos fabricados con petróleo, desde la ropa hasta los alimentos, pasando por el combustible para el coche. Si (cuando) el petróleo deja de estar disponible en el mercado mundial, entonces todos los dólares del mundo perderán su valor.

De hecho, el colapso financiero de 2008 estuvo directamente relacionado con el repunte de los precios del petróleo, que había alcanzado el valor récord de 150 dólares por barril ese año, relacionado a su vez con los altos costes de extracción provocados por el agotamiento. La tumultuosa llegada del petróleo de esquisto al mercado nos dio una pausa de al menos una década en la que los precios del petróleo se mantuvieron altos en promedio, pero nunca volvieron a alcanzar sus valores de 2008. Desde el punto de vista actual, todo es posible: podemos ver más inestabilidades, el colapso de la industria del petróleo de esquisto y más perturbaciones del frágil sistema de producción y suministro de petróleo que bien podrían hacer caer todo el mercado financiero, esta vez de una manera que ningún nuevo truco de flexibilización cuantitativa podrá estabilizar. En ese caso, veríamos nada menos que un golpe a todo el sistema, un verdadero precipicio de Séneca de la peor clase.

Tras el colapso financiero, podríamos ver a los otros tres jinetes del Apocalipsis de Séneca: el colapso comercial, el político y el social. Todavía no hemos llegado a ese punto, pero si todo el sistema pierde el ingrediente de comunicación fundamental que lo mantiene unido: el dinero, es decir, que la gente siga teniendo cosas que vender y haya gente que quiera comprarlas, no solo los compradores no podrán pagar a los vendedores, sino que las mercancías no podrán ser entregadas. Esto significa que las tiendas se quedarían sin nada. ¿Te quedarás sin comida y morirás de hambre? Puede ser. Ya en 2008, una consecuencia del colapso financiero fue que los barcos que

transportaban mercancías por todo el mundo dejaron de moverse. No duró lo suficiente como para causar la muerte por inanición de miles de millones de personas, afortunadamente, pero eso podría ser la consecuencia de un choque financiero más duradero.

Algunos síntomas evidentes del colapso comercial son ya visibles en todo Occidente. Si vives en una zona pobre de tu país, habrás notado que tus opciones en cuanto a tiendas y mercancías disponibles se han reducido drásticamente. Por supuesto, puedes comprar lo que quieras en Amazon.com, pero solo si el sistema financiero aún te lo permite y si todavía hay un sistema de entrega que funcione para llevarlo hasta tu puerta. A mayor escala, las numerosas sanciones económicas promulgadas por el Gobierno de Estados Unidos y sus aliados contra los países que se perciben como enemigos prefiguran la ruptura de la globalización como sistema comercial mundial.

El colapso político va acompañado del colapso comercial. Sin dinero, las personas no pueden comprar nada y se arriesgan a morir de hambre o de frío (o ambas cosas). En este punto, la única posibilidad de mantener el tejido social es que el Gobierno intervenga y proporcione suministros de emergencia, como normalmente intenta hacer en caso de grandes catástrofes naturales. Pero el historial de gestión de catástrofes por parte de los Gobiernos no es bueno. ¿Querrán realmente ayudar a la gente? ¿O preferirán salvarse a sí mismos y a sus compinches?

El colapso social también viene acompañado del colapso comercial y político. Las personas harán lo que puedan para ayudarse mutuamente, pero si las cosas se salen realmente de control, el resultado puede ser un verdadero caos. Ya estamos viendo síntomas evidentes de la ruptura del tejido social en Occidente con la creciente polarización política. En un sistema bipartidista, la gente intenta elegir a personas con ideas similares a las suyas, pero normalmente se supone que las personas que votan al otro partido no son monstruos a los que hay que odiar, como parece ser la norma en nuestros tiempos. El tipo de odio ideológico que impregna nuestra sociedad hoy en día es una verdadera fractura del tejido social. Racismo, odio a los extranjeros, muros defensivos, el sálvese quien pueda, bombardearlos hasta terminar con ellos, armas y municiones en los sótanos de todos, y más. Hasta ahora, parece que todavía se mantiene un barniz de civilización, pero nunca olvidemos que alguien dijo que lo único que separa la civilización de la barbarie son dos comidas calientes. ¿Es una profecía? No. Es un escenario. Y los escenarios a

veces se hacen realidad.

Queda la etapa final, el colapso cultural, la fase en la que las personas dejan de reconocerse en la cultura que sostenía el Estado que se derrumbó. Los romanos dejaron de ser paganos y los rusos dejaron de ser comunistas. Ninguna de las dos cosas era necesariamente mala, era parte de la fuerza inevitable que mueve los sistemas complejos: el cambio. Al pasar el punto de inflexión que supone el colapso, el sistema necesita readaptarse. Lo hizo en colapsos pasados, lo hará en el futuro, al menos, si no conseguimos mitigarlo.

El colapso cultural es un cambio importante, en realidad es gigantesco. Pensemos en lo que le ocurrió al Imperio romano: volvió a la organización política que había existido antes, ciudades-Estado y jefaturas. Pero no fue solo una vuelta al pasado: fue un cambio radical en muchas cosas. El Imperio romano de Occidente dejó como herencia su lengua imperial, el latín, que se convirtió en la lengua sagrada de la Iglesia católica. El latín fue la herramienta de gobierno en lo que se convirtió en un experimento social nunca antes intentado en el mundo: la Edad Media imitó el antiguo orden imperial pero, en lugar de dinero, utilizó los beneficios espirituales que la Iglesia dispensaba a los creyentes.

No quiero decir con esto que la caída del imperio occidental moderno vaya a traer de vuelta a la Iglesia católica, aunque nunca se sabe qué esperar de una organización lo suficientemente resistente como para haber podido sobrevivir durante al menos 1.500 años. Lo que quiero decir es que el cambio cultural que le espera a Occidente será enorme y radical. Puede llevar a la humanidad a una nueva etapa de organización social, al ir en paralelo con la evolución del cerebro humano que nos llevó a la era axial en apenas un par de milenios. Si conseguimos mantener algunas de las capacidades tecnológicas que nuestros tumultuosos tiempos han desarrollado, puede que un día emerjamos en una nueva civilización que pueda ser benévola y misericordiosa consigo misma y también con todas las criaturas de este planeta.

APOCALIPSIS: EL COLAPSO DEL ECOSISTEMA TERRESTRE

Imagina que vives en Jerusalén en el año 70 de nuestra era, e imagina que tienes la oportunidad de subir a una de las murallas, a los muros, y echar un vistazo a lo que ocurre fuera. Ahí fuera, ves los campamentos de cuatro

legiones romanas rodeando la ciudad en posición de ataque, equipados con gigantescas máquinas de asedio. En ese momento, podría estar justificado que sintieras una cierta sensación de que la ciudad está condenada.

De hecho, algunos de tus conciudadanos de Jerusalén parecen haberse vuelto un poco catastrofistas en su sentimiento. Uno de ellos es Jesús hijo de Ananías (Yeshua ben Hananiah), cuyos últimos actos son relatados así por Josefo en La *guerra judía, e*scrita algunos años después de la guerra:

> [...] cada día pronunciaba estas lamentables palabras, como si fuera su voto premeditado: "¡Ay, ay de Jerusalén!". Tampoco dirigía malas palabras a ninguno de los que le golpeaban cada día, ni buenas a los que le daban de comer, sino que esta era su respuesta a todos los hombres; y en realidad no era otra cosa que un melancólico presagio de lo que iba a suceder [...]. Hasta el mismo momento en que vio cumplido su presagio en nuestro asedio cuando cesó. Porque mientras daba la vuelta a la muralla, gritó con toda su fuerza: "¡Ay, ay de la ciudad otra vez, y del pueblo, y de la casa santa!". Y justo cuando añadía al final: "¡Ay, ay de mí mismo!", salió una piedra de una de las máquinas y lo hirió, matándolo inmediatamente. Y mientras pronunciaba los mismos presagios, expiró.

Los profetas de la fatalidad parecen ser comunes en la historia cada vez que la situación comienza a parecer desesperada por una u otra razón. La lista es larga, y Yeshua ben Hananiah es solo uno de ellos. No suelen ser vistos con simpatía y sus letanías son objeto de burla. Se los puede comparar con Chicken Little, que pensó que el cielo se caía porque le cayó una nuez en la cabeza. Pero parece existir un fenómeno básico en los grupos sociales humanos que hace que aparezcan profetas de la fatalidad cada vez que existe la posibilidad de que ocurra algún desastre importante.

Como seguramente has notado, en nuestros tiempos el catastrofismo se ha convertido en una pequeña industria artesanal. Un buen ejemplo es la historia del planeta Nibiru (o tal vez el Planeta X, o tal vez Herculobus, o lo que sea), que se dijo que se dirigía hacia la Tierra y que estaba programado que la golpease en 2012, una predicción basada —al parecer— en un antiguo calendario maya. Quizá los mayas terminaron su calendario con el año correspondiente a nuestro 2012 solo porque habían llegado al final del muro de piedra donde grababan las fechas. En cualquier caso, la historia se hizo popular a pesar de que, por supuesto, nada más grande que los meteoritos ordinarios cayó sobre la Tierra en 2012. La versión más reciente predecía que el planeta Nibiru chocaría con la Tierra en 2017. También se equivocó, y es posible que la llegada de Nibiru se posponga a alguna fecha futura.

Nibiru forma parte de una oleada de amenazas imaginarias que periódicamente recorren Internet en diversas formas y con distintos grados de estupidez. Algunas parecen ser el dominio de completos chiflados: una es la historia de los che*mtrails*, *q*ue ve las inocuas estelas dejadas por los aviones como productos químicos nocivos esparcidos por los poderes fácticos para envenenarnos. Otras leyendas tienen cierta base científica, aunque la amenaza pueda ser salvajemente exagerada, como cuando algunos temen que la quema de combustibles fósiles consuma el oxígeno que respiramos. Es cierto que podemos medir una ligera reducción de la concentración de oxígeno en la atmósfera, pero es minúscula, e incluso la quema de todas las reservas conocidas de combustibles fósiles no conduciría a una disminución lo suficientemente grande como para afectar a la salud humana.

En general, las amenazas existenciales parecen tener cierto poder de venta. Por ejemplo, Listerine se comercializó en los años veinte como un remedio contra la halitosis, o simplemente el mal aliento, que los creadores de la campaña publicitaria describieron agresivamente como una grave amenaza para el éxito social de la gente (Lippert, 2017). Vender Listerine como una forma de que las chicas consiguieran un marido seguramente fue un poco agresivo, aunque no tanto como intentar asustar a la gente con la amenaza de que todo un planeta se nos caiga encima. Pero el problema es que "algunos" ag*o*reros resultan tener razón cuando llega la catástrofe. Después de todo, el pobre Yeshua ben Hananiah había predicho correctamente la caída de Jerusalén en el año 70 de la era cristiana. Por lo tanto, no todos los agoreros pueden ser descartados como locos que desvarían.

En nuestros tiempos, seguramente nos enfrentamos a una serie de amenazas lo suficientemente grandes como para ser una fuente de preocupación no solo para los locos y los profetas, sino para cada uno de nosotros. Por ejemplo, cada pocos años un grupo de miles de los mejores científicos del mundo en materia de clima y ecosistemas se reúne para preparar un nuevo informe de la organización llamada IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático). Y cada pocos años nos dicen que si no dejamos de quemar combustibles fósiles, y rápido, la humanidad estará en serios problemas. A lo que nos enfrentamos es a la posibilidad de una catástrofe más allá de todo lo experimentado por la humanidad. El ecosistema mundial va camino de un aumento de la

temperatura de entre 3 y 4 °C en las próximas décadas, a menos que se tomen medidas verdaderamente draconianas para reducir las emisiones de dióxido de carbono. Y no hay ninguna garantía de que el calentamiento se limite a eso: los efectos de retroalimentación no lineal podrían aumentarlo entre 6 y 8 °C, quizá incluso más. Este nivel de calentamiento tendría un enorme impacto en la ecosfera, amenazando con destruir la civilización tal y como la conocemos, si es que no provoca la extinción de la especie humana. Si eso no es apocalíptico, no sé qué lo es. Y no nos lo dice un loco gritón, sino la comunidad de los mejores científicos del mundo.

Frente a la entidad de la amenaza climática, la respuesta de la comunidad humana ha sido, cuando menos, débil. Se dice que se puede luchar contra el cambio climático separando los residuos, utilizando bombillas de bajo consumo, comprando alimentos locales, utilizando la bicicleta y otras acciones que parecen concebidas principalmente para calmar los sentimientos de culpa, pero poco más que eso. La mayoría de la gente tiende a ignorar la amenaza climática, mientras que una pequeña minoría sostiene a voces que todo es un engaño inventado por un grupo de científicos malvados que pensaron que podían conseguir más becas de investigación y más estudiantes de posgrado exagerando una amenaza inexistente. Los sondeos de opinión muestran que la opinión general sobre el cambio climático sigue estancada en un nivel de 50/50 en lo que al público se refiere, es decir, aproximadamente la mitad de la gente piensa que existe y es una amenaza seria, la otra mitad piensa que no existe o no es un problema. Recientemente, una encuesta realizada por la Universidad de Yale (Leiserowitz et *al.*, 2018) mostró un cierto movimiento hacia una mayor fracción del público que identificaba el cambio climático como algo que debe preocupar. Puede que ahora sean mayoría, pero está por ver cuántos de ellos estarán dispuestos a pagar dinero o hacer sacrificios para combatir el cambio climático. A este respecto, cabe recordar que el movimiento de los "chalecos amarillos" en Francia comenzó en 2018, principalmente, como resultado de la lucha contra el aumento de los precios de los combustibles.

Pero ¿durante cuánto tiempo puede la gente permanecer indiferente a la amenaza a la puerta de sus ciudades? A medida que aumenta la intensidad de la amenaza, se hace cada vez más difícil ignorarla. El cambio de la indiferencia al terror puede adoptar la forma de un verdadero punto de inflexión, según la

evaluación de John Schlesinger de que "la gente solo tiene dos maneras de funcionar, la complacencia y el pánico". El cambio hacia el pánico puede empezar por poco y hay pruebas de que, de hecho, está empezando.

La acumulación de conocimientos sobre el fenómeno llamado "cambio climático" está dando lugar, en efecto, al menos a un grupo de agoreros que afirman que se acerca el fin del mundo (o, como dirían los profetas de las pulgas, "se acerca el fin del perro", como podemos leer en un cómic de Far *Side de* Gary Larsen). Suelen utilizar el término "Near-Term Human Extinction" (NTE o NTHE, "extinción humana a corto plazo") y un miembro bastante conocido del grupo es Guy McPherson que mantiene un blog titulado Nat*ure Bats Last. L*a NTE no es un concepto monolítico, especialmente en el sentido de "a corto plazo", pero, según McPherson, la humanidad podría haber desaparecido ya en su mayor parte o en su totalidad en 2030, que se da como el último año para la humanidad en la Tierra. En una entrevista reciente, McPherson (2019) afirmó que (cursiva en el original):

> En *concreto, predigo que no habrá seres humanos en la Tierra en 2026, b*asándome en las proyecciones del aumento de la temperatura planetaria a corto plazo y la desaparición de innumerables especies que sustentan nuestra propia existencia.

Una predicción bastante atrevida, por no decir otra cosa. Que la población humana pase de casi 8.000 millones a cero en siete años sería una especie de precipicio de Séneca. De hecho, la ideología de la NTE se descarta normalmente, ya que se considera el producto de mentes trastornadas. Hay que decir, además, que los miembros del movimiento NTE hacen poco para hacerse querer por los no creyentes. A menudo, son agresivos en el debate y tienden a adoptar una actitud rígida: la NTE se llevará a cabo porque tiene que ser así. Es algo bastante típico de los grupos que adoptan opiniones extremas y no mayoritarias. Ser una pequeña minoría requiere seguramente desarrollar algunas técnicas de comunicación defensivas, pero el verdadero problema de estas profecías de la fatalidad es que fomentan la pasividad. Si tenemos que morir, ¿para qué molestarse en hacer algo que tal vez pueda evitarlo? Uno bien podría tomarse unas vacaciones en Hawái mientras sea posible. Podría ser peor si el meme de la NTE llega a infestar las mentes de los líderes de opinión y de los responsables políticos. En este caso, si cunde el pánico, la respuesta de los poderes fácticos podría ser, como mínimo, temeraria. Si llegaran a la conclusión de que el cambio climático está causado por demasiados seres

humanos, podrían decidir que deshacerse de la mayoría de ellos es una buena idea. Se trata de una idea inquietante, pero sabemos con qué frecuencia y con qué facilidad en la historia sociedades enteras tienden a entrar en "modo exterminio". Ha ocurrido en el pasado, puede volver a ocurrir.

Al final, ¿existe la posibilidad de que los creyentes de la NTE tengan razón? Aquí, por desgracia, no es posible demostrar que estén equivocados. Sí podemos decir que es poco probable, podemos decir que los modelos no predicen nada parecido, que algunas catástrofes extremas como el efecto Venus parecen estar descartadas por la física del sistema terrestre (Goldblatt y Watson, 2012). Pero también es cierto que en el pasado de la Tierra se produjeron catástrofes relacionadas con el clima y sabemos que los resultados fueron extinciones masivas, en algunos casos supusieron el exterminio de la mayoría de los vertebrados. Son los resultados de erupciones volcánicas masivas conocidas como "grandes provincias ígneas" (GPI). Los efectos de las mayores GPI en la biosfera fueron devastadores (Bond y Wignall, 2014) y ahora se cree que la extinción de los dinosaurios no avianos no fue —al menos no directamente— el resultado del impacto de un gran asteroide sino de una GPI que apareció en la región llamada hoy Decán, en la India. La extinción del final del Pérmico fue causada por otra GPI masiva que apareció en la región conocida hoy como Siberia. Eliminó aproximadamente el 95% de las especies de vertebrados del planeta (Van de Schootbrugge y Wignall, 2016).

Los efectos destructivos de las grandes provincias ígneas no son causados directamente por el calor generado, sino por la emisión de grandes cantidades de dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera. Como es típico de los sistemas complejos, este forzamiento genera una cascada de efectos de retroalimentación potenciadores, que incluyen la liberación del metano almacenado en el permafrost y quizás la combustión de los depósitos de carbón invertidos por el magma caliente. El resultado es que la Tierra se ve empujada en el otro lado de un punto de inflexión, hacia la condición descrita como "Tierra invernadero" (Steffen et *al.*, 2018), en oposición a las condiciones en las que los humanos están acostumbrados a vivir, una "Tierra interglacial". Una "Tierra invernadero" es una Tierra muy caliente en la que las temperaturas son tan elevadas que grandes zonas del planeta son inhabitables para los seres humanos y posiblemente para la mayoría de los vertebrados, mientras que se producen extinciones masivas como

consecuencia de factores como la reducción de la concentración de oxígeno (anoxia), la liberación de sulfuro de hidrógeno venenoso de las bacterias y más efectos nocivos para la vida.

Ahora puedes ver de qué estamos hablando: un tipo de colapso mayor de Séneca no solo para los humanos, sino para toda la biosfera. Por supuesto, no hay un GPI activo en la Tierra hoy en día, pero lo que estamos haciendo con nuestra costumbre de quemar lo que llamamos "combustibles fósiles" está teniendo un efecto similar: estamos bombeando grandes cantidades de gases de efecto invernadero a la atmósfera. El resultado es un forzamiento que podría generar una cascada de retroalimentaciones del mismo tipo que las generadas por los antiguos GPI que destruyeron la mayoría de los ecosistemas de la época. Como factor condenatorio adicional, hoy en día la irradiación solar es más fuerte que en el pasado. Aumenta en torno a un 10% cada mil millones de años y hoy es significativamente mayor que durante los más graves episodios de extinción masiva del pasado. Esto significa que es necesario un forzamiento menor para generar otro gran episodio de calentamiento. No es de extrañar que parezca que hemos entrado en la era de la "sexta extinción masiva" (Ceballos et *al.*, 2015). Las primeras fueron causadas por GPI, la actual es de origen humano.

Entonces, ¿a qué nos enfrentamos exactamente? Los modelos climáticos que utilizamos no pueden proporcionar una evaluación exacta de los efectos de los bucles de retroalimentación que se refuerzan y que podrían llevar a un punto de inflexión climático, pero hay un acuerdo general entre los científicos de que existe algún tipo de "punto de inflexión climático" (Lenton, 2011), aunque nadie puede determinar sus parámetros con exactitud. El énfasis que se da en el Tratado de París a la necesidad de mantenerse por debajo de un máximo de 1,5 o 2 °C de calentamiento se debe al temor de que superar estas temperaturas significaría pasar el punto de inflexión. Pero, una vez más, estos valores no se han determinado mediante cálculos cuantitativos, sino que son una suposición y podrían ser una suposición optimista.

En general, no podemos excluir que estemos condenados, pero también es cierto que está lejos de ser seguro y, por lo que sabemos, todavía hay mucho margen de maniobra para evitar lo peor. Lo que sí es razonablemente cierto es que los daños serán enormes mucho antes de que la Tierra caliente elimine a la humanidad, si es que lo hace. Las sequías relacionadas con el clima pueden

destruir una fracción lo suficientemente grande de la producción agrícola como para provocar hambrunas generalizadas. O el fenómeno opuesto, las inundaciones, pueden hacer lo mismo al arrasar el suelo fértil. El aumento del nivel del mar también puede causar un efecto similar: hacer los puertos inoperables interrumpiría el flujo vital de alimentos que transportan los buques portacontenedores. No está claro si los grandes fenómenos meteorológicos, huracanes o tornados, podrían tener efectos desastrosos de la misma magnitud, pero no se puede descartar. Ante estas amenazas cada vez más graves, los seres humanos podrían reaccionar de diferentes maneras: la regla básica de la política es encontrar una forma de culpar a otro, por lo que un posible resultado sería redoblar los esfuerzos para ignorar las amenazas. Por el contrario, un punto de inflexión en la percepción podría hacer que las élites decidieran pasar a intentos desesperados de reconducir la situación utilizando la geoingeniería, con todas las incógnitas que ello conlleva. ¿Quién sabe? Puede que incluso funcione. O bien las élites podrían decidir deshacerse de los pobres y salvarse a sí mismas ocupando regiones en el alto norte o en las montañas.

Por lo común, para los que no formamos parte de la élite, el futuro no parece ser brillante en cuanto a lo que nos depara el cambio climático, e incluso si resulta que se forma parte de la élite, el futuro también parece difícil. Pero la belleza del futuro es que no se puede predecir. Así que marchamos hacia el futuro siempre equipados con una herramienta indispensable: la esperanza.

BIBLIOGRAFÍA

Archibald, J. D. (2014): "Lo que el registro de dinosaurios dice sobre los escenarios de extinción", Geo*logical Society of America Special Papers, v*ol. 505, pp. 213-224.

B. R. (2015): "Un curso intensivo de probabilidad", The *Economist, h*ttps://econ.st/3tELa6O.

Bardi, U. (2005): "La economía mineral: un modelo para la forma de las curvas de producción de petróleo", Ene*rgy Policy, v*ol. 33, pp. 53-61.

— (2012): "El hundimiento del E-Cat", Cas*sandra's Legacy, h*ttps://cassandralegacy.blogspot.com/.

— (2015): "Los límites del crecimiento en la Unión Soviética", Cas*sandra's Legacy, h*ttps://cassandralegacy.blogspot.com/.

— (2016): "El pico del petróleo en un mundo sin hechos: la nueva 'bonanza petrolera' en el oeste de Texas", Cas*sandra's Legacy, h*ttps://bit.ly/3aZJ1Mu.

— (2017): "Crimea: de la guerra mundial o a la tercera guerra mundial", Cas*sandra's Legacy,*

https://cassandralegacy.blogspot.com/.
— (2017): "El lado oscuro de Internet: la estafa del 'código cuántico' y sus implicaciones", *Cassandra's Legacy*, https://cassandralegacy.blogspot.com/.
— (2019): "El pico del petróleo, 20 años después: ¿previsión fallida o visión útil?", *Energy Research & Social Science*, vol. 48, pp. 257-261.
Bardi, U.; Falsini, S. y Perissi, I. (2019): "Toward a general theory of societal collapse: a biophysical examination of tainter's model of the diminishing returns of complexity", *Biophysical Economics and Sustainability*, vol. 4, p. 3.
Berman, A. (2016): "El gigante petrolero del Pérmico perdería 500.000 millones de dólares a los precios actuales", https://www.artberman.com/.
Bond, D. y Wignall, P. (2014): "Large igneous provinces and mass extinctions: an update", *Geological Society of America*, vol. 505, pp. 29-55.
Brecke, P. (2011): "Conflicto", https://brecke.inta.gatech.edu/research/conflict/.
Brown, E. (2018): "La esclavitud de la deuda estudiantil: es hora de nivelar el campo de juego", *Counterpunch*.
Buntgen, U. et *al.* (2011): "2500 años de variabilidad climática europea y susceptibilidad humana", *Science*, vol. 331, pp. 578-582.
Campbell, C. J. y Laherrère, J. F. (1998): "El fin del petróleo barato", *Scientific American*, marzo.
Carvajal et *al.* (2012): "Diagnóstico y rehabilitación de estructuras reales de hormigón armado en zonas costeras", *Corrosion Engineering, Science and Technology*, vol. 47, pp. 70-77.
Ceballos, G. et *al.* (2015): "Aceleración de la pérdida de especies inducida por el hombre moderno: Entrando en la sexta extinción masiva", *Science Advances*, vol. 1.
Clauset, A. (2018): "Tendencias y fluctuaciones en la gravedad de las guerras interestatales", *Science Advances*, vol. 4, nº 2.
Darmon, N. y Drewnowski, A. (2008): "¿Predice la clase social la calidad de la dieta?", *American Journal of Clinical Nutrition*, vol. 87, pp. 1107-1117.
Doctorow, C. (2003): *Down and Out in the Magic Kingdom*, Nueva York, Tor Books.
— (2013): "La desigualdad de la riqueza es aún peor en las economías de reputación", *Locus Magazine*.
Ebert, R. (2004): "Night of the Living Dead Movie Review", https://bit.ly/3xsYNXW.
E-Cat Word (2012): Declaración de la Universidad de Bolonia sobre las pruebas de e-cat, https://bit.ly/3mTtro025.
Ehrlich, P. R. (1968): La *bomba demográfica*, Nueva York, Sierra Club/Ballantine Books.
Friedemann, A. J. (2016): *Cuando los camiones dejen de circular. La energía y el futuro del transporte*, Berlín, Springer.
Fukuyama, F. (1992): El *fin de la historia y el último hombre*, Estados Unidos, Free Press.
Glanz, J.; Kaplan, T. y Nicas, J. (2019): "En el accidente de Etiopía, se sospecha de un sensor defectuoso en el Boeing 737", The *New York Times*, https://nyti.ms/3xUs3Ie.
Goldblatt, C. y Watson, A. J. (2012): "The runaway greenhouse: implications for future climate change, geoengineering and planetary atmospheres", *Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 370, pp. 4197-4216.
Graeber, D. (2011): La *deuda: los primeros 5.000 años*, Nueva Jersey, Melville House.
Griffith, A. A. (1921): "Los fenómenos de ruptura y flujo en los sólidos", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, A 221, pp. 163-198.
Harper, K. (2017): "How climate change and disease helped the fall of Rome-Quartz",

https://bit.ly/3xv3YXk.

HasELL, J. y RoSER, M. (2018): "Famines", Our *World in Data, h*ttps://ourworldindata.org/famines.

HerLEY, C. (2012): "¿Por qué los estafadores nigerianos dicen que son de Nigeria?", Wor*kshop on the Economics of Information Security.*

*H*ESS, G. D. (1995): "Una introducción a Lewis Fry Richardson y su teoría matemática de la guerra y la paz", Con*flict Management and Peace Science, v*ol. 14, pp. 77-113.

HÖÖK ET *al. (*1994): "Desarrollo de las teorías sobre la formación del petróleo y su importancia para el pico del petróleo", Mar*ine and Petroleum Geology, v*ol. 27, pp. 1995-2004.

KiOUS, W. J. y TilLING, R. I. (1994): "This dynamic earth: the story of plate tectonics", Servicio Geológico de los Estados Unidos.

KirP, D. L. (2002): Cas*i en casa: America's Love-Hate Relationship with Community, P*rinceton, Princeton University Press.

KleINMAN, Z. (2019): "MySpace admite haber perdido 12 años de subidas de música", BBC *News, h*ttps://www.bbc.com/news/technology-47610936.

KouLAKOV, I. et *al. (*2016): "El sistema de alimentación del supervolcán Toba desde la losa hasta el depósito poco profundo", Nat*ure Communications, v*ol. 7.

KraMER, S. N. (1963): Los *sumerios: su historia, cultura y carácter, C*hicago, University of Chicago Press.

KriVIT, S. B. (2012): "Rossi's NASA test fails to launch", New *Energy Times.*

*K*ruGER, J. y DunNING, D. (1999): "Unskilled and unaware of it: how difficulties in recognizing one's own incompetence lead to inflated self-assessments", Jou*rnal of Personality and Social Psychology, v*ol. 77, pp. 1121-1134.

LanE, C. S.; ChoRN, B. T. y JohNSON, T. C. (2013): "Ash from the Toba supereruption in Lake Malawi shows no volcanic winter in East Africa at 75 ka", Pro*ceedings of the National Academy of Sciences, v*ol. 110, pp. 8025-8029.

Lee, B. Y. et *al. (*2017): "Un enfoque sistémico de la obesidad", Nut*rition Reviews, v*ol. 75, pp. 94-106.

LeiSEROWITZ, A. et *al. (*2018): "Climate change in the american mind", Yale Programon Climate Communication.

LenTON, T. M. (20114): "Alerta temprana de los puntos de inflexión del clima", Nat*ure Climate Change, v*ol. 1, pp. 201-209.

LipPERT, B. (2017): "Revisión del anuncio clásico: Listerina y el aleluya de la halitosis", Ad *Age, h*ttps://bit.ly/3xXrsWA.

LowENSTERN, J. B.; SmiTH, R. B. y HilL, D. P. (2006): "Monitoring super-volcanoes: geophysical and geochemical signals at Yellowstone and other large caldera systems", Phi*losophical Transactions of the Royal Society, v*ol. 364, pp. 2055-2072.

LugO, A. E. (2019): Efe*ctos socio-ecológicos-tecnológicos del huracán María en Puerto Rico, B*erlín, Springer.

MarTELLONI, G.; Di PATTI, F. y BarDI, U. (2018): "Pattern analysis of world conflicts over the past 600 years", Cornell University, arXiv:1812.08071v4.

McGEE, B. (2017): "Contratos de transporte: descifrando las turbias normas de las aerolíneas", USA *Today, h*ttps://bit.ly/3tDkgw5.

McPHERSON, G. (2019): "La naturaleza late por última vez: nuestros días están contados. Persigue con pasión una vida de excelencia", Nat*ure Bats Last, h*ttps://guymcpherson.com/.

McWHINNEY, J. (2011): "Fracasos masivos de fondos de cobertura", Inv*estopedia, h*ttps://bit.ly/3xVJJDv.

MeiSSNER, M. (2017): "China's social credit system", Chi*na Monitor, v*ol. 4.

MINSKY, H. P. (1992): "The financial instability hypothesis", https://bit.ly/39x9SPB.
MITCHELL-INNES, A. (1914): "La teoría crediticia del dinero", *Banking Law Journal*, vol. 14, pp. 151-168.
MOUSSEAU, F. (2005): "¿Ayuda alimentaria o soberanía alimentaria?", Oakland Institute.
ODELL, P. R. (2011): "Petróleo y gas: Crises and Controversies 1961-2000", *Multi-Science Publishing Co. Ltd.*
ORLOV, D. (2011): "Reinventar el colapso: The Soviet Experience and American Prospects", *New Society Publishers.*
— (2013): "Las cinco etapas del colapso", *New Society Publishers.*
PEARL, J. y MACKENZIE, D. (2018): *The Book of Why: La nueva ciencia de la causa y el efecto,* Nueva York, Basic Books.
PINKER, S. (2011): *Los mejores ángeles de nuestra naturaleza,* Nueva York, Viking Books.
RAFFERTY, T. (2011): "El estado de la literatura zombi: una autopsia", *The New York Times.*
RAMPINO, M. R. y SELF, S. (1993): "Bottleneck in human evolution and the Toba eruption", *Science,* vol. 262, p. 1955.
REYNOLDS, D. B. (2016): *Cold War Energy: El ascenso y la caída de la Unión Soviética,* Mishawaka, Better World Books.
RHODE, S. (2013): "El TEPT relacionado con la deuda y el TEPT financiero perjudica silenciosamente a muchos", *Get Out of Debt.*
RICHARDSON L. F. (1960): *Statistics of Deadly Quarrels,* Reino Unido, The Boxwood Press.
RINDZEVIČIŪTĖ, E. (2015): "Hacia un futuro conjunto más allá del telón de acero: la política este-oeste del modelado global", en Andersson, J. y Rindzevičiūtė, E. (eds.), *The Struggle for the Long Term in Transnational Science and Politics,* pp. 115-143, Londres, Routledge.
RITCHIE, H. y ROSER, M. (2018): "Desastres naturales, visión empírica", https://ourworldindata.org/natural-disasters.
RUMMEL, R. J. (2004): *War & Democide: Never Again,* Estados Unidos, Lumina Press.
— (2019): "Libertad, democidio, guerra", http://www.hawaii.edu/powerkills/.
S. A. (2015): "Lapis scandali: La pietra dello scandalo", *Roma y el arte,* http://www.romeandart.eu/it/arte-lapis-scandali.html.
S. A. (2017): "Bullying Statistics Bullying y suicidio", https://bit.ly/3bopBHh.
S. A. (2017): "The ecrumbling history of Puerto Rico", *Globe Gazette,* https://bit.ly/3MZTh4y.
S. A. (2018): "Estamos en la cúspide de la más rápida, profunda y consecuente disrupción del transporte de la historia", https://www.rethinkx.com/headlines.
SATELL, G. (2014): "Un vistazo a por qué Blockbuster realmente fracasó y por qué no tuvo que hacerlo", *Forbes,* https://bit.ly/3HHHaZb.
SONDLAND, G. (2019): "The fight for EU energy security", https://bit.ly/3OfUhmf.
STANHOPE, K. L. (2016): "Consumo de azúcar, enfermedad metabólica y obesidad: el estado de la controversia", *Critical Reviews in Clinical Laboratory Sciences,* vol. 53, pp. 52-67.
STEFFEN, W. et *al.* (2018): "Trayectorias del sistema terrestre en el Antropoceno", *Proceedings of the National Academy of Sciences,* vol. 115, pp. 8252-8259.
TAINTER, J. A. (1996): "Complejidad, resolución de problemas y sociedades sostenibles", en Constanza R., *Getting Down to Earth: Practical Applications of Ecological Economics,* Washington, Island Press.
TALEB, N. (2007): *El cisne negro,* Nueva York, Random House.
TEHRANIRAD, B. et *al.* (2015): "Far-field tsunami impact in the North Atlantic basin from large flank collapses of the Cumbre Vieja Volcano, La Palma", *Pure and Applied Geophysics,* vol. 172, pp. 3589-3616.

Townsend, S. (2013): El *ecologista desnudo,* Londres, Futerra.

Van de Schootbrugge, B. y Wignall, P. B. (2016): "A tale of two extinctions: converging end-Permian and end-Triassic scenarios", *Geological Magazine,* vol. 153, pp. 332-354.

Waal, F. B. De (2000): "Primates: un patrimonio natural de resolución de conflictos", *Science,* vol. 289, pp. 586-590.

Wack, P. (1985): "Escenarios: aguas inexploradas por delante", *Harvard Business Review,* https://bit.ly/3HtjqYs.

Wackernagel, M. et *al.* (1999): "National natural capital accounting with the ecological footprint concept", *Ecological Economics,* vol. 29, pp. 375-390.

Wagner, T. E. (2013): "Cinco razones por las que 8 de cada 10 empresas fracasan", *Forbes.*

4. ESTRATEGIAS PARA GESTIONAR EL COLAPSO

> Por lo tanto, luchar y vencer en todas tus batallas no es la excelencia suprema; la excelencia suprema consiste en romper la resistencia del enemigo sin luchar.
>
> Sun Tzu, El *arte de la guerra*

*E*L PROGRESO TECNOLÓGICO CONTRA EL COLAPSO: EL MILAGRO QUE NO FUE DE LA FUSIÓN FRÍA

En marzo de 1989, Martin Fleischmann y Stanley Pons, investigadores en electroquímica de la Universidad de Utah, en Salt Lake City, publicaron su que habían logrado la fusión a temperatura ambiente de núcleos de deuterio mediante un proceso electroquímico. Se trataba de un nuevo campo de la ciencia nuclear que denominaron "fusión fría". Si era cierto, no era solo el descubrimiento del siglo, sino el del milenio: con sus tubos de ensayo, Fleischmann y Pons habían conseguido, al parecer, aprovechar la misma energía que hace arder las estrellas. Era un descubrimiento que podía acabar con todos los temores de quedarse sin petróleo en un momento en el que todavía estaba fresco el recuerdo de la gran crisis del petróleo de los años setenta.

En los meses que siguieron al anuncio, casi todos los científicos del mundo que tenían alguna experiencia en física del estado sólido o en electroquímica dejaron de hacer lo que estaban haciendo para examinar el nuevo descubrimiento. Yo formé parte de esa multitud: ese año, en julio, viajé a California para pasar el verano y trabajar en el Laboratorio Nacional de Lawrence de Berkeley. Allí tenían uno de los mejores laboratorios de ciencia de superficies y electroquímica del mundo, y si alguien era capaz de confirmar las afirmaciones de la fusión fría, eran ellos.

Cuando llegué a Berkeley, esperaba encontrar a mis colegas entusiasmados por el nuevo descubrimiento y quizás trabajando en él. Pero me encontré con que ya habían superado esa etapa y ahora estaban decepcionados. Habían intentado replicar los experimentos de fusión fría sin obtener ningún resultado. Habían llegado a la conclusión de que toda la historia era un error o,

peor aún, una estafa. Así que pasé ese verano en Berkeley trabajando en temas no relacionados con la fusión fría, pero no me había rendido: la fascinación por la idea de poder replicar una estrella en un tubo de ensayo era demasiado fuerte. Así que, de vuelta a Italia, en septiembre, pensé que podría hacer algunos experimentos yo mismo utilizando un montaje diferente al que habían utilizado mis colegas en Berkeley para experimentar. Tal vez, de ese modo, podría ver algo que ellos habían pasado por alto.

No voy a molestaros con los detalles de lo que hice, podéis encontrar un poco más en una entrada de mi blog El *legado de Casandra* (Bardi, 2012). Solo os diré que pasé unos meses trabajando solo en mi laboratorio, sintiéndome un poco como el Dr. Zarkov, el personaje de los cómics de *Flash Gordon*, que construye una nave espacial en su sótano.

Pero en mi caso, no salió ninguna nave espacial del laboratorio. Pronto descubrí que si existía la "fusión fría" era un efecto muy débil. No se trataba de un efecto tan fuerte como el que afirmaban Fleischmann y Pons cuando hablaban de la "ignición" del deuterio que utilizaban en sus experimentos. No importaba lo que intentara hacer, no podía ver nada parecido con mi montaje.

No me di por vencido inmediatamente, ya que en aquella época había una cierta atmósfera de "avistamiento de Elvis" sobre la fusión fría. No era muy diferente a las muchas afirmaciones de haber visto a Elvis Presley vivo en los años ochenta, después de que muriera en 1977. Las reclamaciones de pruebas experimentales de la fusión fría aparecían por todas partes y eso me hizo pensar que tal vez era un mal experimentador, que estaba cometiendo algún error. El efecto de avistamiento de Elvis puede ser fuerte: uno tiende a ver lo que otras personas dicen haber visto. Varias veces creí haber visto una señal que demostraba que, efectivamente, se estaba produciendo una reacción nuclear en el recipiente de acero que estaba utilizando para la prueba. Parecía que, realmente, la energía que alimenta a las estrellas había aparecido en mi laboratorio. Pero cuando volví a llevar a cabo el experimento, la señal había desaparecido. Estaba persiguiendo un fantasma y, en la Navidad de 1989, me rendí.

Repensando esa vieja historia, creo que tuve suerte de perder solo unos meses de trabajo. Otros pasaban años, se jugaban su reputación en algunos resultados inciertos y se retiraban décadas después afirmando que la esquiva fusión a temperatura ambiente estaba a un experimento más. Una de las

características de la "ciencia patológica" es que la señal es siempre débil, al límite de la sensibilidad de los instrumentos. Pero solo los científicos patológicamente optimistas pudieron ver esa señal y, poco a poco, la fusión fría se alejó de la ciencia para instalarse en algo realizado por coloridas figuras de pseudocientíficos o genios solitarios locos que pregonan máquinas extrañas y afirman que van a revolucionar el mundo. Pero eso es siempre para el año que viene, o para cuando la nueva máquina o la nueva prueba esté lista. Cambiar el nombre de un campo desacreditado no ayudó: convertir la "fusión fría" en el más sonoro "reacciones nucleares de baja energía" (LENR, por sus siglas en inglés), no cambió el hecho de que la fusión nuclear no es ni puede ser de "baja energía". Se puede llamar como se quiera, fusión fría o LENR, pero resultó estar lleno de sonido y furia, sin significar nada.

Poco a poco, el interés por la idea se fue desvaneciendo, pero aún hoy la gente sigue fascinada con la idea de reproducir una estrella en un tubo de ensayo. Así que 30 años después de las primeras afirmaciones de Fleischmann y Pons, el gigante de la comunicación Google contrató a algunos investigadores para un programa destinado a intentar de nuevo encontrar signos de fusión nuclear a una temperatura cercana a la ambiente (Berlinguette et *al.*, 2019); como era de esperar, no consiguieron nada: solo repitieron los experimentos que ya se habían hecho, confirmando que no existe la fusión fría (o LENR). Igualmente, podrían haber enviado a sus investigadores a buscar el arca perdida de la alianza.

Este entusiasmo por algo que no existe se alimentó siempre, aunque no fuera un fenómeno físico nuevo: la fusión nuclear se conocía desde hacía al menos medio siglo. La fusión fría siempre se presentó como algo que cumpliría la profecía de los años cincuenta de que las tecnologías nucleares nos traerían energía "demasiado barata para medirla". Era una profecía nacida de los increíbles logros de las décadas de 1940 y 1950, cuando realmente parecía que la energía nuclear era una caja de Pandora que nos traería la abundancia perpetua. Nadie que haya visto de adolescente la película de Walt Disney Nue*stro amigo el átomo (19*57) puede olvidar el ambiente de expectación por las grandes cosas que se avecinaban en aquellos años.

Pero la realidad estaba, como siempre, a la vuelta de la esquina y la promesa de la fusión nuclear resultó ser mucho menos emocionante de lo que parecía al principio. Aparte de los accidentes, el problema de la proliferación y las

dificultades para controlar la tecnología, pronto se descubrió que las reservas minerales de uranio distaban mucho de ser suficientes para el tipo de prosperidad ilimitada que se había imaginado al principio. Si quisiéramos tener suficiente combustible para la abundancia en la que se había creído en los años cincuenta, tendríamos que dedicarnos a la sucia y peligrosa tarea de "criar" combustibles nucleares en forma de plutonio para compensar los escasos recursos de uranio. Pero la idea se desechó pronto: era demasiado compleja, cara y arriesgada en términos políticos. Nadie quería que el plutonio se convirtiera en algo común en todo el mundo cuando podía utilizarse para fabricar cabezas nucleares o, más sencillamente, convertirse en un veneno mortal. Eso dejaba a la fusión nuclear como el caballo de batalla de las esperanzas nucleares: la energía que alimenta a las estrellas. Parecía obvio que si pudiéramos tenerla aquí, en la Tierra, todos los problemas con la energía se desvanecerían para siempre.

Por desgracia, la fusión nuclear controlada resultó ser un sueño difícil de alcanzar. No es imposible de conseguir en nuestro planeta: se puede hacer dentro de las cabezas nucleares, pero ese no es el tipo de tecnología que se puede utilizar para alimentar la red eléctrica. Con lo que se soñaba era el concepto de fusión nuclear "controlada", el mismo tipo de domesticación de las enormes energías nucleares que se había obtenido con la fisión nuclear. En la década de 1950 parecía el siguiente paso en una progresión imparable de mejores tecnologías, pero las cosas resultaron ser más difíciles de lo imaginado. Se invirtieron décadas de trabajo y miles de millones de dólares para construir máquinas "Tokamak" cada vez más grandes, que supuestamente podrían alcanzar temperaturas tan altas que la fusión nuclear "caliente" tendría lugar a un ritmo suficientemente rápido para producir energía útil. Hasta ese momento, el único resultado obtenido fue demostrar que se necesitaba una máquina más grande. La última encarnación de este enfoque de "lo grande es bello" es la máquina ITER, que se está construyendo en el sur de Francia. Es tan grande que 35 países tuvieron que poner en común sus recursos para hacer posible el proyecto. La construcción se inició en 2007 y está previsto que la máquina empiece a funcionar como reactor de fusión en 2035 (ITER, 2018). Eso no significa que el ITER vaya a producir energía útil: se necesitará una máquina nueva y aún mayor para ello si es que llega a funcionar. Y aún más incierto es que su uso tenga sentido desde el punto de vista económico. A este ritmo, nuestra civilización puede pasar por un par de

precipicios de Séneca antes de que encontremos la manera de hacer que este tipo de máquinas sean útiles para algo.

Otros enfoques de la fusión que no se basan en los Tokamaks también resultaron llevar a callejones sin salida. A menudo, es posible crear dispositivos capaces de producir fusión nuclear, el problema es convertirlos en fuentes de energía útiles. Puede que haya un problema fundamental: a pesar de todo el bombo y platillo, puede que la fusión nuclear no sea una gran idea para lo que necesitamos. La densidad de potencia del Sol es ridículamente baja: menos de 300 vatios por metro cúbico (Cohen, 1998). El motor de un coche pequeño puede tener una densidad de potencia miles de veces mayor. Parece que a la naturaleza no le gusta mantener densidades de potencia muy altas durante mucho tiempo y las estrellas son máquinas espectaculares pero no muy eficientes. Así que el sueño de una energía barata y abundante a partir de reacciones nucleares puede seguir siendo un sueño, al menos en nuestro planeta.

Pero pongamos en marcha la máquina de los sueños y empecemos a especular un poco. ¿Qué pasaría si realmente pudiéramos desarrollar una tecnología milagrosa que nos proporcionara energía casi gratuita, no contaminante y abundante? ¿Nos ayudaría eso a evitar el inminente precipicio de Séneca de nuestra civilización?

En primer lugar, con energía barata y abundante, el agotamiento de los recursos minerales no sería un problema. Ya no necesitaríamos extraer de las menas que se agotan, podríamos simplemente extraer de la corteza cualquier elemento que necesitásemos. Sería el concepto de la "máquina minera universal" (Bardi, 2008), un mecanismo que come rocas y escupe su contenido bien ordenado en cajas de elementos puros. Una máquina así es físicamente posible, pero hoy en día no tendría sentido debido a los horrendos costes en términos de energía que necesitaría. Pero ¿qué pasaría si pudiéramos aumentar el suministro de energía global mediante un factor, digamos, de cien o mil? Entonces sí que podríamos minar la corteza terrestre para obtener todos los elementos químicos que necesitásemos. Por supuesto, estas máquinas también producirían una cantidad gigantesca de contaminación, pero podrían enviarse a la Luna o a los asteroides y la contaminación se quedaría allí mientras los materiales preciosos extraídos podrían enviarse a la Tierra. O bien, con energía abundante, podríamos enviar la contaminación al espacio.

Entonces, ¿qué hay del problema de la superpoblación humana? La energía barata y abundante podría resolver también ese problema. Podríamos utilizar la luz artificial para impulsar la fotosíntesis a una escala realmente gigantesca. Hay una maravillosa novela de ciencia ficción de Robert Hanson Heinlein, La *luna es una amante dura (19*65), que describe un futuro en el que la Luna se ha convertido en un granero para una población terrestre en constante expansión, y el grano se envía a la Tierra por medio de una "catapulta electromagnética". Si algo así fuera posible, podríamos convertir la Tierra en un planeta similar a Trantor, la capital galáctica descrita en la Ser*ie del Imperio Galáctico de* Isaac Asimov: un planeta completamente urbanizado formado por una única y gigantesca ciudad que cubre toda la masa terrestre. De ser así, podríamos tener cientos de miles de millones de personas en la Tierra y, probablemente, ninguna otra especie de masa corporal superior a unos pocos kilos, excepto, quizás, las vacas. Tal vez también se podrían criar vacas en la Luna.

Si dispusiéramos de grandes cantidades de energía barata, podríamos enviar a la gente al espacio y hacer que viviera en gigantescos hábitats artificiales en órbita alrededor de la Tierra, un atrevido plan propuesto en 1974 por Gerard O'Neill, en parte como respuesta a los escenarios de colapso propuestos en la primera edición de Los *límites del crecimiento, e*n 1972. El concepto de O'Neill se basaba en inmensos hábitats presurizados que se situarían en los puntos de Lagrange L4 y L5, donde la interacción de los campos gravitatorios de la Luna, la Tierra y el Sol generarían un mínimo en el potencial gravitatorio. En estos puntos, un objeto puede permanecer en una posición estable, en principio, para siempre. Algunos sueños de colonización del espacio resultaron ser aún más grandiosos. En 1960, Freeman Dyson propuso que todo el sistema solar podría convertirse en una inmensa esfera que rodeara al Sol, construida con la materia obtenida al desmantelar los planetas. Si tal hazaña fuera posible, aumentaría el hábitat humano en un factor enorme en comparación con la ocupación de la superficie de un solo planeta. Algunos otros estudios consideran incluso la posibilidad de colonizar toda la galaxia, aunque la velocidad de la luz es un límite absoluto que, por lo que sabemos, no se puede superar, incluso a velocidades relativamente lentas, una especie inteligente podría colonizar la galaxia en tiempos del orden de un millón de años (Newman y Sagan, 1981).

El concepto de energía ilimitada disponible puede modelizarse y así se hizo por primera vez en el estudio de 1972 Los *límites del crecimiento* (Meadows et *al.*, 1972). El modelo utilizado no consideraba la energía como un parámetro desagregado, pero podía modelizarse indirectamente eliminando los límites del flujo de recursos naturales en la economía. Una simulación en este sentido ya se realizó en el primer estudio de Lim*its,* en 1972, y se confirmó en las versiones posteriores: la infinitud de la energía disponible pospone el colapso, pero lo genera de todos modos como resultado de una combinación de superpoblación, agotamiento del suelo agrícola y contaminación. Pero si también se eliminan estos límites, suponiendo una expansión hacia el espacio, entonces tenemos un escenario que los autores del estudio denominaron "infinito de entrada, infinito de salida" (IFI-IFO, por sus siglas en inglés). Y como era de esperar, el resultado es que la economía y la población humana siguen creciendo para siempre o, al menos, durante todo el tiempo que se quiera ejecutar el modelo en el futuro. Sí, pero también Papá Noel podría resolver muchos problemas si existiera.

Así pues, volvamos al mundo real y examinemos qué podríamos hacer razonablemente en términos de progreso tecnológico para evitar el precipicio de Séneca para nuestra civilización o, al menos, mitigar sus daños. Por supuesto, primero debemos preguntarnos qué entendemos por progreso. ¿Naves espaciales?, ¿sma*rtphones?,* ¿rayos láser?, ¿píldoras para la erección? Todo esto y más, pero ¿qué es lo que une a todas esas cosas? ¿Cómo podemos definir el progreso? Y ¿cómo podemos medirlo cuando no estamos seguros de cómo definirlo? Una cosa que podemos decir al respecto es que se trata de una idea relativamente nueva: los antiguos romanos o la población de la Edad Media no veían ninguna diferencia en su forma de vivir en comparación con la de sus padres o abuelos, y ni siquiera con gente que había vivido siglos antes. Les habría desconcertado la idea de que, de alguna manera, el hecho de manipular cosas mecánicas cambiaría sus vidas y mejoraría el mundo. No fue hasta el siglo XVIII cuando Edward Gibbon señaló la tendencia del progreso tecnológico, quizá por primera vez en la historia, en su obra His*toria de la decadencia y caída del Imperio romano* (1788), cuando escribió que "los antiguos carecían de muchas de las comodidades de la vida que han sido inventadas o mejoradas por el progreso de la industria". Con el tiempo, el concepto de progreso se convirtió en un lugar común y el entusiasmo por el

progreso probablemente alcanzó su máximo nivel a mediados del siglo XX, cuando la "era atómica" estaba en pleno apogeo y la gente esperaba robots domésticos amigables, coches voladores y fines de semana en la Luna para toda la familia. A mediados del siglo XX también se realizaron los primeros intentos de cuantificar el progreso.

El mérito de haber sido el primero en tratar de cuantificar el progreso corresponde quizá a Robert Anson Heinlein (1907-1988), conocido sobre todo como escritor de ciencia ficción. En su artículo de 1952 titulado "La caja de Pandora" (publicado originalmente con el título "¿A dónde?"), propuso que el progreso tecnológico había crecido exponencialmente hasta entonces y seguiría haciéndolo en el futuro, aportando maravillas inimaginables a la humanidad. Fue un intento audaz de entender un concepto difícil, pero también erróneo en muchos aspectos. Heinlein ni siquiera intentó definir o cuantificar su concepto de "progreso tecnológico", sino que se limitó a dibujar a mano una curva creciente en un gráfico cartesiano. Luego, sus predicciones detalladas resultaron ser casi todas erróneas. Habló de la antigravedad, de los vuelos espaciales para las masas, de la prolongación de la vida de los seres humanos en más de 100 años y de muchas otras maravillas que nunca se materializaron. Por el contrario, no imaginó cosas como Internet, los teléfonos móviles, los ordenadores personales y la mayoría de lo que hoy consideramos manifestaciones tangibles del progreso.

Pero la idea de que la tecnología crece exponencialmente parecía estar madura ya en la década de 1950 y apareció de forma diferente cuando, en 1956, el economista Robert Solow publicó los resultados de un estudio que suele considerarse la base de la comprensión del progreso tecnológico en economía, "El cambio técnico y la función de producción agregada" (1956). Solow pudo ajustar sus datos asumiendo la presencia de un factor, al que llamó "A(t)", que crecía exponencialmente con el tiempo. Esta entidad pasó a conocerse como "residuo de Solow" o "productividad total de los factores" (PTF) y se suele entender como una medida cuantitativa del progreso tecnológico. Según Solow, crece exponencialmente con el tiempo a un ritmo del 1 al 2% anual. Si este factor pudiera seguir creciendo eternamente, compensaría fácilmente factores como la disminución de la disponibilidad de los recursos naturales, como argumentó, por ejemplo, William Nordhaus en 1992. ¿Solo entre un 1 y un 2% al año? No parece tan difícil. Si pudiéramos mantener ese ritmo de

crecimiento del progreso, la A(t) se desharía de todos los precipicios y mantendría la economía en crecimiento para siempre o, al menos, durante mucho, mucho tiempo. Sin duda, se trata de una idea reconfortante y a estas alturas está bastante arraigada en la economía y entre los responsables políticos. Tanto es así que cuando aparece un problema, la reacción automática de muchos políticos es "debemos financiar más investigación".

Pero ¿es cierto que el progreso crece exponencialmente con el tiempo? ¿Y qué es exactamente ese "residuo de Solow"? ¿Cómo podemos estar seguros de que seguirá creciendo exponencialmente, suponiendo que eso es lo que ha estado haciendo hasta ahora? ¿Y podemos confiar en un parámetro que no puede medirse, sino que solo puede inferirse sobre la base de un modelo muy simplificado? El residuo identificado por Solow puede existir realmente, pero puede estar relacionado con factores distintos del progreso tecnológico. Puede ser simplemente proporcional al suministro de energía al sistema, como propone, entre otros, Robert Ayres (Warr y Ayres, 2010). Así pues, el factor incorpóreo de la PTF puede ser en realidad algo mucho más concreto de lo que se creía. De hecho, la concepción convencional de la PTF fue criticada por Herman Daly en su Ste*ady state Economics (19*77) donde podemos leer en el capítulo 5 que:

> La idea de que la tecnología es responsable de la mitad o más del aumento de la producción observado en los últimos tiempos es un hallazgo sobre el que los propios econometristas no están de acuerdo. Por ejemplo, D. W. Jorgenson y Z. Grilliches descubrieron que "si el producto real y el insumo real de los factores se contabilizan con precisión, el crecimiento observado en la productividad total de los factores es insignificante" (1967). En otras palabras, el incremento de la producción real de 1945 a 1965 se explica casi totalmente (96,7%) por los incrementos de los insumos reales, quedando muy poco residuo (3,3%) para imputar al cambio técnico. Estos resultados ponen en duda la idea de que la tecnología, sin la ayuda de un mayor flujo de recursos, pueda proporcionarnos enormes aumentos de la producción. De hecho, la propia ley de conservación de la materia y la energía debería hacernos escépticos ante la afirmación de que la producción real puede aumentar continuamente sin que aumenten los insumos reales.

Otra cuestión sobre el papel del residuo de la PTF se deriva del hecho de que puede ser la única entidad en economía que se supone que sigue creciendo para siempre. Esto es cuando menos curioso, teniendo en cuenta el concepto establecido de "rendimientos decrecientes" en las ciencias económicas. ¿Por qué el progreso tecnológico debería estar exento de esta ley tan general? Este

punto fue examinado ya en los años setenta por Giarini y Laubergé (1978) y más recientemente por Tainter (2006). De estos estudios se desprende que el ritmo de crecimiento del progreso tecnológico está disminuyendo en nuestra época. Ya no crece de forma exponencial, suponiendo que lo hiciera en el pasado.

Hay muchas áreas tecnológicas que progresan muy lentamente, si es que lo hacen. Basta pensar en que la esperanza de vida media de los seres humanos ya no aumenta de forma significativa tras el espectacular aumento observado hasta hace unas décadas. Incluso los supuestos más sonados, como la "ley de Moore" en electrónica, están mostrando signos de fatiga. La ley de Moore indicaba que el número de elementos colocados en un chip informático debía duplicarse cada dos años, aproximadamente. Pero en los últimos años se ha ralentizado claramente —quizá simplemente desaparezca— (Niccolai, 2015). La misteriosa fuerza tecnológica que se dice que impulsa la economía puede estar hecha de lo mismo que la fusión fría: sueños y malas mediciones.

Esto no significa que el progreso tecnológico no exista, sino que debemos considerarlo como algo real, algo que funciona, algo que no son parámetros inciertos de modelos inciertos. ¿Qué tipo de tecnología necesitamos para evitar el precipicio de Séneca al que nos enfrentamos?

Hoy en día, gran parte de la investigación gira en torno a soluciones que agravarían el problema. Pensemos en los biocombustibles: son otra solución instintiva a los problemas de agotamiento. ¿Nos estamos quedando sin petróleo? ¿Cuál es el problema? ¡Usaremos biocombustibles! Pero eso no tiene sentido si se piensa cuantitativamente. La fotosíntesis, el proceso que utilizan las plantas para crear moléculas orgánicas a partir de la luz solar y el dióxido de carbono atmosférico, no es muy eficiente en torno al 1% de media, probablemente, menos que eso para los cultivos. Así, es fácil calcular que si utilizáramos la agricultura para producir el combustible necesario para la gigantesca flota de vehículos impulsados por combustibles fósiles de hoy en día, utilizaríamos la mayor parte de la tierra agrícola disponible (Giampietro y Mayumi, 2009). Y seguramente, la idea de matar de hambre a la gente para alimentar a los coches no parece muy inteligente. Hasta ahora, el esfuerzo en el cultivo de biocombustibles se ha traducido principalmente en la destrucción masiva de muchos bosques primitivos para cultivar aceite de palma y, como consecuencia, en la casi extinción de los orangutanes. Todo ello solo para la producción de poco más del 2% del total del gasóleo producido en el mundo

(Bardi, 2019). Tal vez no te importe el colapso Séneca de los orangutanes, pero seguro que no nos salvará de nuestro propio colapso. Entonces, ¿merece la pena?

Se pueden hacer consideraciones similares con respecto a los numerosos esfuerzos que se llevan a cabo para desarrollar tecnologías que nos hagan más eficientes en materia energética. Sin duda, se trata de una tarea valiosa en muchos aspectos. Es bueno aislar nuestras casas, usar coches más eficientes, luces LED, transporte público, alimentos ecológicos y cosas así pero ¿nos salvaría del agotamiento y del colapso climático? Desgraciadamente, en muchos casos todas estas ideas relacionadas con la eficiencia no son más que un "ecoblanqueo" (gre*en washing).* No es que sean malas ideas, pero su rendimiento económico es lento: se tarda varios años en recuperar la inversión en, por ejemplo, el aislamiento de la casa y se nos acaba el tiempo en relación con el agotamiento de los minerales y el cambio climático. Además, existe un efecto perverso asociado a las tecnologías que mejoran la eficiencia. Probablemente, hayas oído hablar de la "paradoja de Jevons", descrita por primera vez en el libro de Jevons de 1866 La *cuestión del carbón. L*a idea fundamental de Jevons era que las mejoras en la eficiencia no conducen a una reducción de la cantidad de energía utilizada, algo que pudo demostrar mediante datos sobre el uso de las máquinas de vapor alimentadas con carbón en Inglaterra durante el siglo XIX. No es obvio que la "paradoja" se mantenga exactamente en su forma original en los tiempos modernos, pero los estudios tienden a apoyar esta idea (Saunders, 2000) bajo nombres como "efecto rebote", "backfire" y "postulado de Khazzoom-Brookes". De hecho, la idea tiene mucho sentido: no es en absoluto una paradoja. Imagina que aíslas tu casa: significa que ahorras dinero en gastos de calefacción y ¿qué harás con ese dinero? Tal vez hagas una donación al WWF para salvar a las tortugas de la isla de Pago-Pago, pero lo más probable es que te vayas de vacaciones a Hawái usando al menos la misma cantidad de recursos fósiles y generando la misma cantidad de contaminación que habrías generado con tu sistema de calefacción antes de aislar tu casa.

Este debate puede sonar pesimista, pero no tenemos que desanimarnos, solo tenemos que ser más creativos. Si la tecnología no puede producir milagros, también es cierto que quizá no los necesitemos. Hemos visto que los sistemas complejos son máquinas productoras de entropía que se alimentan

de potenciales energéticos. Por lo tanto, si queremos que el sistema complejo que llamamos "civilización" siga funcionando de una u otra forma, tenemos que proporcionarle alimento: una cantidad de energía comparable a la que se produce hoy en día principalmente por medio de los combustibles fósiles. No es imposible. El artículo que yo mismo, Perissi, Csala y Sgouridis publicamos en 2016 con el título "The Sower's Way" muestra que las tecnologías renovables de las que disponemos hoy en día, principalmente la eólica y la fotovoltaica, son lo suficientemente buenas como para sustituir el flujo de energía que obtenemos actualmente de los menguantes recursos de combustibles fósiles sin causar emisiones de efecto invernadero. También descubrimos que sería posible utilizar los combustibles fósiles restantes para poner en marcha una infraestructura basada en las renovables que, a la postre, ya no necesitaría combustibles fósiles. En otras palabras, utilizaríamos los combustibles fósiles de la misma manera que nuestros ancestros agricultores utilizaron el maíz guardado de la cosecha anterior para la nueva. Una buena idea que tiene una pega: será muy cara, aunque no imposible. Los datos también muestran que si queremos esta transición, tenemos que empezar a pagarla ya. Tenemos que multiplicar por 50 la cantidad de energía invertida en la creación de una nueva infraestructura energética. Es poco probable que eso ocurra, teniendo en cuenta que en el debate actual los líderes de opinión aún no se han dado cuenta del verdadero potencial de las energías renovables. Al parecer, no somos tan sabios como nuestros antepasados y creemos que lo bueno es que nos comamos nuestro maíz de siembra. Mientras mantengamos esta actitud, ningún progreso tecnológico nos salvará del precipicio de Séneca que se avecina.

Para concluir este capítulo, permíteme señalar que existe otra visión del progreso tecnológico, más grande y ambiciosa que la que se deriva de las curvas suaves de los modelos económicos. Como ejemplo de esta visión, podemos citar el libro de Kevin Kelly Out *of Control* (1994), donde encontramos una descripción del progreso que se produjo como una crítica directa al estudio de Los *límites del crecimiento*. Leemos en la página 575 que:

> Los modelos de retroalimentación directa, como los de Los *límites del crecimiento*, pueden lograr la estabilización, un atributo de los sistemas vivos, pero no pueden aprender, crecer o diversificarse, tres complejidades esenciales para un modelo de cultura o vida cambiante. Sin estas capacidades, un modelo de mundo quedará muy por detrás de la realidad en movimiento.

Un modelo sin aprendizaje puede usarse para anticipar el futuro cercano en el que el cambio coevolutivo es mínimo; pero para predecir un sistema evolutivo —si es que alguna vez puede predecirse en su totalidad— se requerirá la exquisita complejidad de un modelo evolutivo artificial simulado.

Y además:

Los *límites del crecimiento no* puede imitar el surgimiento de la revolución industrial a partir de la era agraria. "Tampoco", admite Meadows, "puede llevar al mundo desde la revolución industrial hasta lo que sea que venga después".

Desde este punto de vista, el progreso es algo que se mueve a saltos, en realidad a "saltos cuánticos", y a medida que crece, se dispara cambiándolo todo radicalmente y para siempre. Desde el punto de vista humano, en algún momento, el progreso parecerá, literalmente, salir disparado hacia el infinito. Según algunas interpretaciones, este fenómeno llevará a la humanidad a trascender a un estatus casi divino, "transhumano", una idea que puede haber sido expresada por primera vez, en su forma moderna, en el libro de Robert Ettinger De *hombre a superhombre, p*ublicado originalmente en 1972. El proponente más reciente del concepto de singularidad tecnológica es probablemente Ray Kurzweil, que ha publicado varios libros sobre el tema. Entre ellos The *Singularity is near (2*005). Estas ideas son fascinantes, pero por el momento se mantienen en el ámbito de las posibilidades del futuro. Si la humanidad pasa por una singularidad tecnológica, no podemos saber a dónde irá, y ni siquiera si seguirá existiendo después.

Incluso sin estas posibilidades extremas, está claro que la tecnología, en su expresión de inteligencia artificial (IA), nos está llevando a algún lugar, y ese lugar puede no ser exactamente adonde queremos ir. La Red está invadiendo cada vez más nuestras mentes, cambiándonos, en lugar de cambiar nuestro entorno. En lugar de encontrar el truco mágico de la energía para tenerla en abundancia, puede llevarnos a no necesitarla. Pero ¿lo hará? Permitidme citar un artículo reciente de George Dyson en Edg*e:*

*L*a mayoría de nosotros, la mayor parte del tiempo, seguimos las instrucciones que nos dan los ordenadores y no al revés. La revolución digital ha cerrado el círculo y la siguiente revolución, la analógica, ha comenzado. Nadie se atreve a pronunciar su nombre.

La genialidad —a veces deliberada, a veces accidental— de las empresas que ahora se encuentran en un ascenso tan pronunciado es que han encontrado su camino a través del espejo y han surgido como algo diferente. Sus modelos ya no son modelos. El motor de

búsqueda ya no es un modelo de conocimiento humano, sino que es *con*ocimiento humano. Lo que comenzó como un mapeo del significado humano ahora define el significado humano y ha comenzado a controlar, en lugar de simplemente catalogar o indexar, el pensamiento humano. Nadie está a los mandos. Si un número suficiente de conductores se suscribe a un mapa en tiempo real, el tráfico está controlado sin ningún modelo central, excepto el propio tráfico. La red social de éxito ya no es un modelo del grafo social, es el grafo social.

Imaginamos que los individuos, o los algoritmos individuales, siguen estando detrás de la cortina en algún lugar, con el control. Nos engañamos a nosotros mismos. Los nuevos guardianes, al controlar el flujo de información, gobiernan un sector creciente del mundo (Dyson, 2019).

¿Qué nos va a pasar? ¿Esto alterará la forma en que están construidos nuestros cerebros con el deseo arraigado de tener más? ¿Nos llevará a aprender a vivir con los límites que tenemos? Pase lo que pase, el futuro nunca es como el pasado: si el próximo precipicio de Séneca tendrá lugar en el espacio real o en el virtual eso no podemos decirlo.

EL LADO MALO DEL COLAPSO: LA ESTRATEGIA DE YAGO

Con Yago, en Ote*lo, W*illiam Shakespeare creó quizá el mejor personaje malvado de la historia de la literatura. Todo el drama se basa en la sutil trama de Yago para vengarse de su amo, Otelo, haciéndole sospechar que su mujer, Desdémona, le ha traicionado. En la historia, ni Otelo ni Desdémona se describen como personas especialmente tontas, pero se ven superadas por la superioridad de la astucia de Yago, que aprovecha cada detalle, cada oportunidad, cada acontecimiento, para avivar las sospechas de Otelo hasta que, finalmente, este se ve abocado a matar a su esposa y luego a suicidarse.

En los tiempos modernos, parece que los sutiles y sofisticados personajes malvados de la literatura del pasado, como Yago, han sido sustituidos por feos monstruos dotados de poco más que una sonrisa satánica y el tipo de risa que hace las veces de "¡ja, ja, ja!" en los cómics. Pero si los personajes malvados han existido en la ficción desde los tiempos de la sacerdotisa sumeria Enheduanna, es porque son el espejo de algo real. En la vida cotidiana, rara vez se ve el equivalente del Joker, el archivillano del universo de Batman, pero sí se ven equivalentes de Yago en términos de personas que manejan los giros y las trampas de lo que llamamos "intrigas de oficina". Algunas personas parecen mostrar una habilidad asombrosa para manejar las cosas de tal

manera que dañan a otras personas. También pueden destruirse a sí mismas. No sé si será tu experiencia, pero yo he visto que eso ocurría más de una vez en mi carrera. Y, por supuesto, la maldad es un hecho común en la política, donde las personas en posiciones de poder pueden hacernos mucho daño a todos nosotros.

Yago es realmente la encarnación del concepto de maldad en el sentido atribuido al propio Satanás descrito como "el maestro de la mentira". ¿Cómo se consigue esta capacidad de archivillano? Yo diría que Yago domina la ciencia de los sistemas complejos. Sus acciones siguen los principios básicos de la teoría de la fractura de Griffith: se dedica a crear pequeñas grietas en la red de las relaciones sociales entre los personajes que le rodean, haciendo que las fisuras crezcan aprovechando las tensiones internas de las conexiones. Las grietas crecen hasta confluir en una sola en la relación entre Otelo y Desdémona. La grieta crece más que la longitud de Griffith y hace que el sistema se vuelva crítico y pase por un punto de inflexión: se produce la tragedia, como sabemos. Podríamos llamar a esta técnica de destrucción de un sistema complejo "la estrategia de Yago".

La idea de utilizar el colapso para deshacerse de los competidores y enemigos va más allá de las acciones individuales y puede convertirse en una estrategia empresarial o política. Especialmente en política, la calumnia es una estrategia bien conocida y perfeccionada, que a veces recibe el nombre de "muc*kraking" c*uando la realizan los periodistas. En algunos casos, la calumnia forma parte de una estrategia electoral: un ejemplo es cómo Lyndon Johnson perjudicó a su oponente, Barry Goldwater, en las elecciones presidenciales de 1964 acusándole de planear una guerra nuclear. A mayor escala, el método forma parte del concepto de "periodismo amarillo", una técnica que combina exageraciones, afirmaciones descabelladas y acusaciones sin fundamento dirigidas a personas específicas. Se hizo popular en Estados Unidos a partir de finales del siglo XIX, y sigue siendo muy popular en la actualidad. Basta recordar el caso de Dominique Strauss-Kahn, directivo y político francés, que fue acusado en 2011 de haber agredido sexualmente a una camarera de hotel en Nueva York. La historia fue, y sigue siendo, muy polémica pero seguramente frustró sus ambiciones de competir por la presidencia de Francia.

La idea de provocar el colapso de un adversario puede no referirse únicamente a las luchas políticas. Como decía Von Clausewitz, la guerra no es

más que la continuación de la política por otros medios y la capacidad de provocar el colapso del enemigo tiene evidentes implicaciones militares. La guerra es, después de todo, una lucha que implica sistemas complejos: los ejércitos luchan y maniobran entre sí, países enteros los apoyan, la batalla continúa y termina cuando uno de los dos bandos se derrumba como resultado de la tensión acumulada.

La forma más brutal y costosa de deshacerse de un enemigo es destruirlo. Pero, ya en la Antigüedad, Sun Tzu señaló cómo "toda guerra se basa en el engaño". Eso parece implicar que la mejor manera de ganar una guerra sería explotar las tensiones internas de la estructura en red del enemigo, y esto debe hacerse de manera encubierta. Entonces, el enemigo se vencerá a sí mismo y, citando de nuevo a Sun Tzu, "el arte supremo de la guerra es someter al enemigo sin luchar". Hay que decir que, en los tiempos modernos, estas ideas no parecen ser muy populares entre los militares o los políticos. Tal vez, una ola de barbarie esté invadiendo el mundo, pero la Segunda Guerra Mundial fue la última gran guerra que fue declarada formalmente por los Gobiernos implicados en ella. Después, solo se declararon realmente algunas guerras locales, a pesar de que se libraron muchas. Hoy en día, la guerra continúa hasta que el bando perdedor es totalmente destruido y sus líderes capturados y a menudo ejecutados.

Las guerras pueden ser más crueles y despiadadas que antes también por otro factor: la participación de civiles. Por supuesto, el exterminio de civiles es una tradición antigua pero, en nuestros tiempos, se supone que es ilegal y quienes atacan directamente a los civiles se arriesgan a ser colgados cuando la guerra termine (por supuesto, solo si están en el bando perdedor). En la práctica, la idea de considerar a los civiles como objetivo de guerra legítimo está profundamente arraigada en el pensamiento militar actual. Parece que fue propuesta explícitamente por primera vez en los tiempos modernos por Giulio Douhet, oficial italiano y autor de El *dominio del aire (Il dominio dell'aria)* (1921). Las ideas de Douhet parecen sacadas de un personaje malvado de un cómic, una especie de "Joker" primitivo, aunque no tenemos constancia de que Dohuet intercalara ataques de risa satánica en sus intervenciones sobre estrategia. Pero el concepto que proponía era realmente maligno: abandonar toda guerra convencional concebida como una lucha de fuerzas armadas y concentrarse en cambio en el bombardeo aéreo para matar a los civiles.

Tendrán que rendirse, de lo contrario serán exterminados.

La idea de matar a todos los del otro bando está en la base del despliegue de las diversas armas de exterminio masivo que se acumularon y a veces se utilizaron a lo largo del siglo XX. Todavía hoy, Estados Unidos y Rusia tienen una considerable capacidad de ensañamiento entre sí y contra toda la humanidad en cuanto al número de armas nucleares que almacenan. Puede que otros países no sean capaces de exterminar a la humanidad utilizando las armas nucleares que poseen, pero parece que están haciendo grandes esfuerzos en esa dirección.

Además de las armas nucleares, existen posibilidades interesantes (en cierto sentido) de exterminio masivo mediante armas químicas y biológicas, aunque ninguna de ellas parece haber sido experimentada a gran escala, hasta ahora. Lo mismo ocurre con la última generación de armas de alta tecnología: los drones, que también podrían utilizarse con fines de exterminio. Por el momento, parece que solo se utilizan para "asesinatos selectivos" dirigidos contra un número relativamente pequeño de objetivos. Los últimos datos disponibles hablan de unas 10.000 víctimas de ataques con drones llevados a cabo por las fuerzas estadounidenses desde 2004 hasta la fecha (The Bureau of Investigative Journalism, 2019). No tenemos ni idea de lo fiable que puede ser esta estimación. Si lo es, se trata de un número relativamente pequeño de víctimas, pero seguramente la guerra con drones podría intensificarse y estas armas convertirse en verdaderas herramientas de asesinato en masa. El concepto de "microdrones asesinos" se ha descrito en la película de 2017 Sla*ughterbots, d*el instituto Future of Life y Stuart Russell. Se basa en la idea de pequeños drones que llevan una pequeña carga explosiva, suficiente para matar a una persona, y con tecnologías de reconocimiento facial capaces de identificar a personas determinadas o a cualquiera que lleve un determinado uniforme o tenga algunos rasgos faciales étnicos en concreto. Si eso no es maldad, no sé qué es. Tal vez los fabricantes de esta arma podrían mejorarla añadiendo la capacidad de que el dron emita una risa satánica que haga ¡ja, ja, ja, ja! justo antes de matar a su objetivo explotando cerca de su frente. Afortunadamente, parece que esta tecnología no está disponible, todavía, pero no hay razón para que no pueda desarrollarse en el futuro.

El exterminio masivo es, sin duda, una forma de empujar a un enemigo por un empinado precipicio de Séneca, pero parece un poco drástico como

método. Además, tiene un gran problema que, curiosamente, Douhet y sus seguidores olvidaron por completo tener en cuenta. Si tienes una tecnología barata y eficaz para matarlos, lo más probable es que ellos también la tengan para usarla contra ti. Y eso hace que las cosas sean un poco problemáticas con el riesgo de un exterminio simétrico recíproco, como casi ocurrió en Europa durante la Segunda Guerra Mundial con los bombardeos aéreos en los que se involucraron los aliados y las fuerzas del eje. Es extraño que este punto no parezca claro ni para la población ni para los responsables políticos. Por ejemplo, una encuesta reciente llevada a cabo por el *Bulletin of The Atomic Scientists* (Haworth, Sagan y Valentino, 2019) encuentra un fuerte apoyo en el pueblo estadounidense a un ataque nuclear preventivo contra Corea que acabaría con un millón de personas allí. Aparentemente, muchas personas están encantadas con la idea de empujar a otros por lo que podría ser el precipicio más empinado de todos, el exterminio nuclear, sin pensar demasiado en lo que la nación objetivo del ataque podría hacer en términos de represalias. Pero acabar con la gente de ambos lados hasta que no quede nadie vivo parece un poco estúpido como estrategia militar, por decir algo. ¿No podemos pensar en algo más inteligente?

Si la guerra es una lucha que afecta a la estabilidad de los sistemas complejos, una estrategia inteligente consistiría en explotar la estructura en red de la sociedad enemiga para hacerla colapsar: es la visión de la ciencia de los sistemas. Un ejército, o cualquier organización de lucha, es una red y en todas las redes los nodos deben comunicarse entre sí. Por lo tanto, todo ejército es susceptible de colapsar debido a una pérdida de comunicación y, en particular, al efecto de retroalimentación que se produce cuando los nodos se comunican entre sí información incorrecta. Por ejemplo, si un soldado empieza a huir del campo de batalla, los soldados cercanos reciben la comunicación de que las cosas no van bien y pueden empezar a huir también. Las retroalimentaciones de mejora se imponen y todo el ejército se deshace: es la pesadilla de todos los generales, antiguos y modernos.

Evitar que esto ocurra es la razón por la que los ejércitos modernos son redes piramidales en las que cada nodo se comunica casi exclusivamente con la capa superior y la inferior. Los soldados no se dan órdenes entre sí, sino que las reciben de sus oficiales, que a su vez reciben órdenes de oficiales de nivel superior, y todo el ejército depende de un mando central. Este tipo de

estructura evita la situación ya mencionada pero hace que el ejército sea sensible al "golpe de descabezamiento". Si toda la comunicación debe pasar por un solo nodo de la red, entonces eliminar este nodo es una forma de generar un colapso Séneca.

El problema de la idea de destruir una estructura militar por descabezamiento es doble: lo primero es que esta vulnerabilidad es bien conocida y normalmente se aplican estrategias para garantizar que los líderes sean difíciles de liquidar. Por ejemplo, en Estados Unidos, el presidente tiene un búnker bajo la Casa Blanca que se supone que se utiliza como refugio seguro y centro de comunicaciones en caso de emergencia. En caso de una guerra importante y de amenazas contra el territorio estadounidense, se espera que el presidente vuele en un "avión del día del juicio final", un avión con el único propósito de mantener al presidente en el aire, donde es presumiblemente difícil de localizar y, por tanto, seguro.

Un enfoque diferente para contrarrestar el riesgo de un ataque de descabezamiento es abandonar la típica estructura rígida de los ejércitos y adoptar una flexible con pequeñas unidades capaces de seguir luchando incluso si pierden el contacto con su centro de mando. Se trata de una forma de lucha de la que fue pionero Edwin Rommel en el frente italiano durante la Primera Guerra Mundial. Un ejemplo reciente de resiliencia en un conflicto armado es el enfrentamiento de 2006 entre Israel y Hezbolá en el Líbano, donde Hezbolá aplicó con éxito esta estrategia.

El concepto de inducir un colapso en el ejército enemigo es una forma de mejorar la eficacia de la guerra y, al mismo tiempo, de reducir el coste y la violencia de un conflicto, pero sigue enraizado en la visión convencional de las guerras libradas por los ejércitos. Hoy en día, la idea misma de los ejércitos convencionales puede estar obsoleta. La guerra está cada vez más integrada en la estructura de la sociedad adoptando diferentes formas bajo el concepto general de "guerra híbrida". Los ejércitos modernos forman parte de una red que incluye la estructura económica, social, política y religiosa de todo un país. Atacar o debilitar esta red más amplia puede hacer que se derrumbe y aunque el ejército pueda mantener su capacidad de lucha, se vuelve inútil sin un país que lo apoye.

Es una idea que sigue la línea de la propuesta de exterminio planteada por Douhet, pero es más sofisticada: una guerra híbrida no consiste en exterminar a los civiles, al menos no directamente. Se trata de debilitar la estructura

económica y social de un país enemigo, a ser posible provocando su colapso para que ya no pueda soportar un esfuerzo bélico. Un buen ejemplo es la caída de la Unión Soviética en 1991. El Ejército Rojo no fue derrotado, ni siquiera atacado, y en el momento de la caída, mantuvo la mayor parte de su capacidad de lucha. Pero ya no había Gobierno capaz de pagar los sueldos de los soldados y los oficiales. De esta forma, el ejército sufrió un colapso de Séneca y se disolvió.

La guerra económica es un componente común de la guerra híbrida. Puede adoptar diferentes formas: en su forma más brutal consiste simplemente en matar de hambre a la población enemiga, hasta la muerte si es necesario. Hay muchos ejemplos de la aplicación de esta estrategia en tiempos antiguos. Tenemos un ejemplo conmovedor en la descripción del asedio a Jerusalén en el año 70 de la era cristiana por parte de Flavio Josefo, donde nos cuenta detalles tan gráficos como que las madres se comieron a sus hijos. En tiempos modernos, podemos recordar cómo, en 2018, el secretario de Estado de Estados Unidos, Rex Tillerson, declaró que las sanciones económicas promulgadas contra Corea del Norte impuestas a partir de 2006 eran efectivas debido a la evidencia de las muertes causadas por hambre en el país (Tillerson, 2018).

Una variante específica de la guerra económica es la "guerra energética", que consiste en matar de hambre a un país enemigo, no de alimentos, sino de energía. Es posible que los aliados la probaran por primera vez con su ataque a las presas alemanas en 1943 en la Operación Chastise, realizada con una "bomba de rebote" diseñada para rozar la superficie de las cuencas hidroeléctricas alemanas antes de detonar contra el muro de la presa. El ataque tuvo éxito en el sentido de que causó daños considerables en las presas alemanas, pero tuvo pocos efectos a largo plazo y costó a los aliados el 40% de los aviones atacantes.

Otro caso fue el ataque aéreo israelí llevado a cabo el 7 de junio de 1981 que destruyó un reactor nuclear iraquí al sureste de Bagdad; la planta estaba aún en construcción y no contenía material nuclear. Más tarde, los iraquíes atacaron un reactor nuclear iraní en Bushehr en 1987. Ninguno de los dos ataques tuvo un efecto militar significativo. Posteriormente, en la campaña de bombardeos de la OTAN contra Yugoslavia de 1999 se produjeron ataques dirigidos específicamente contra centrales eléctricas. Durante las primeras fases de la campaña, los aviones de la OTAN utilizaron una "bomba blanda" especial o

"bomba de grafito", creada específicamente para emitir una nube de grafito con el fin de cortocircuitar las conexiones de las centrales eléctricas. La prensa occidental informó de que estas bombas inutilizaron alrededor del 70% de la red eléctrica serbia. Los serbios admitieron que sufrieron apagones, pero también afirmaron que pudieron restablecer la energía en poco tiempo y que el efecto de los ataques fue insignificante. No parece que tengamos una evaluación fiable de los resultados reales de los ataques y, en cualquier caso, después de ese primer ataque, la OTAN no utilizó más bombas de grafito, prefiriendo utilizar armas convencionales dirigidas contra las centrales eléctricas y los centros de transformación. Ninguno de estos ataques consiguió obligar a Serbia a rendirse y, hasta ahora, la idea de atacar la red energética de todo un país nunca ha sido muy eficaz. Pero si tuviera éxito a gran escala, las consecuencias de dejar a todo un país sin energía durante mucho tiempo serían tan devastadoras que serían casi inconcebibles, un colapso de Séneca que nadie querría ver.

En general, la forma más sencilla de causar daños económicos a una población enemiga es por medio de sanciones económicas. Puede ser un arma muy poderosa y puede matar de hambre a países enteros, aunque, en los tiempos modernos, parece que las sanciones rara vez se llevan a cabo hasta sus últimas consecuencias. Por ejemplo, el embargo económico contra Irak tras la primera guerra del Golfo en 1991 se relajó para permitir a Irak exportar petróleo con el fin de importar alimentos y evitar la inanición masiva de su población.

En general, la idea en la que se basan todos los métodos de guerra híbrida es que la población civil a la que se dirige no debe ser exterminada, sino que debe desanimarse y dejar de apoyar el esfuerzo bélico. En la historia, esto ha resultado difícil y a menudo contraproducente. Las personas hambrientas o bombardeadas normalmente dirigirán su odio hacia los que les están matando de hambre o bombardeando, no necesariamente contra su Gobierno, por muy opresivo y dictatorial que sea. Si quieres un ejemplo de cómo las sanciones económicas pueden fallar, considera el caso de las sanciones internacionales contra Italia impuestas por la Sociedad de las Naciones entre 1935 y 1936 (Ristuccia, 1935) después de que Italia invadiera Etiopía. Las sanciones generaron fuertes sentimientos nacionalistas en el país y reforzaron el control del Partido Nacional Fascista sobre el Gobierno. Más tarde, cuando Gran Bretaña aplicó un embargo de carbón contra Italia, el resultado fue que

Alemania se convirtió en el principal proveedor de carbón de Italia y eso le llevó a unirse a Alemania durante la Segunda Guerra Mundial (Bardini, 1998). Los embargos parecen conseguir normalmente exactamente el efecto contrario al que buscan cuando se establecen. O, quizá, sea esa la razón por la que se establecen exactamente, para obligar a un país a ir a la guerra incluso en condiciones desfavorables.

Así pues, parece que si queremos provocar el colapso de un enemigo sin necesidad de una guerra convencional, necesitamos algo más sutil y eficaz que las bombas o las sanciones económicas: tenemos que convencer a la población del país objetivo de que su enemigo es su propio Gobierno. Esta es la base del subconjunto de la guerra híbrida conocido como "psy*ops*" *(*operaciones psicológicas). Es una forma de hacer la guerra que se basa principalmente en la propaganda, pero con algunos giros adicionales. Normalmente, la propaganda adopta un enfoque reactivo, tratando de influir en la percepción de la realidad por parte de la gente mediante tres técnicas cardinales: la ofuscación (negar u ocultar información), la saturación (distraer al público mediante información irrelevante) y el giro (presentar la información de forma favorable a una determinada interpretación) (Kopp, 2006). Siguiendo esta línea, la propaganda es una tecnología de creación de consenso que se utiliza principalmente como herramienta para reforzar la cohesión nacional. A menudo, dicha cohesión se consigue desarrollando el odio contra algún enemigo político, étnico o religioso.

Las psy*ops ut*ilizan algunas de las técnicas típicas de la propaganda, pero son más agresivas y tienden a ser proactivas para estimular algún tipo de acción. Probablemente, la mejor manera de describirlas es mediante una cita atribuida a un "ayudante de la Administración Bush" en el momento de la invasión de Irak en 2003, en un artículo de Ron Suskind en The *New York Times, e*n 2004. La cita se atribuye a menudo a Karl Rove, aunque el propio Rove negó ser el autor. Merece la pena publicarla íntegramente:

El ayudante dijo que los tipos como yo pertenecían a lo que llamamos "la comunidad basada en la realidad", a la que definió como gente que "cree que las soluciones surgen del estudio juicioso de la realidad discernible". Asentí con la cabeza y murmuré algo sobre los principios de la Ilustración y el empirismo. Me cortó. "El mundo ya no funciona así", continuó. "Ahora somos un imperio y cuando actuamos, creamos nuestra propia realidad. Y mientras tú estudias esa realidad —con buen criterio, como quieres—, nosotros volveremos a actuar, creando otras realidades nuevas, que tú también podrás estudiar, y así es como se resolverán las cosas.

Nosotros somos los actores de la historia… y ustedes, todos ustedes, se limitarán a estudiar lo que hacemos".

Aquí se ven los principios agresivos básicos de las operaciones psicológicas: la idea no es solo distorsionar la realidad, como hace la propaganda, se trata de transformar la realidad en algo que es una creación propia. La obra maestra de las psy*ops en* los últimos tiempos ha sido la creación de las supuestas "armas de destrucción masiva" que se decía que el Gobierno de Irak almacenaba en algún lugar del país. Era a esas armas inexistentes a las que se refería Karl Rove cuando hablaba de "crear la realidad".

Las psy*ops ta*mbién pueden tener carácter transnacional y dirigirse directamente al sistema social y político de un país extranjero. Se trata de un concepto muy innovador: hasta ahora, la propaganda había estado vinculada a memes culturales compartidos en el país donde se originaba. Por ejemplo, durante la Segunda Guerra Mundial, no fue difícil convencer a los estadounidenses de que odiasen a los japoneses, descritos en varias ocasiones como malvados y monos, pero las mismas técnicas difícilmente habrían funcionado en Japón. Tal vez el primer ejemplo de éxito de una operación psicológica transnacional fue Mata Hari, la bailarina holandesa acusada de espionaje y fusilada por los franceses en 1917. No se conocen todos los detalles de esta historia, pero parece claro que Mata Hari no era una espía: el caso pudo haber sido creado por el servicio secreto alemán para compensar el error que habían cometido en 1916, cuando fusilaron a una enfermera británica, Edith Cavell, bajo la misma acusación. Los aliados habían explotado ampliamente el caso Cavell para pintar a los alemanes como malvados bárbaros y los alemanes pudieron haber intentado corresponder (Bardi, 2017). No funcionó muy bien: Mata Hari fue ampliamente vilipendiada como una malvada fem*me fatale por* la prensa francesa y su ejecución no generó la indignación internacional que tuvo Edith Cavell. En aquella época, las operaciones psicológicas aún no eran tan sofisticadas como ahora. En tiempos más recientes, se ha dicho que la caída del Gobierno ucraniano prorruso en 2014 fue el resultado de una operación psicológica llevada a cabo por las potencias occidentales para llevar a Ucrania a la esfera de influencia occidental. La operación recibió el nombre de Revolución Naranja y fue solo una de las varias "revoluciones de colores" que se han producido en varios lugares del mundo durante las últimas dos décadas aproximadamente, en particular en los antiguos países soviéticos,

Wikipedia tiene una lista de 23 de ellas. Algunas tuvieron éxito, como la de Ucrania, otras han sido un completo fracaso, como la "Revolución Violeta" de 2009, que pretendía derrocar al primer ministro de Italia, Silvio Berlusconi. No hay pruebas de que todas fueran operaciones psicológicas controladas por potencias extranjeras, pero es posible que al menos algunas lo fueran.

En general, las revoluciones de colores no parecen estar de moda, hoy en día, sustituidas por operaciones más sofisticadas basadas en Internet. La supuesta colusión de Donald Trump y los servicios secretos rusos para influir en las elecciones de la campaña presidencial estadounidense de 2016 es un ejemplo de una posible operación psicológica basada en Internet. En 2019, la investigación del Consejo Especial (también conocida como la "investigación de Mueller") no encontró pruebas de colusión, pero es una inferencia segura que los Gobiernos de todo el mundo están involucrados en tratar de afectar las políticas de otros países. Aquellos que controlan la Red controlan el mundo entero y, en la actualidad, la Red parece ser un campo de batalla en el que todos los actores de la escena internacional están inmersos en una lucha gigantesca.

Las operaciones psicológicas no consisten únicamente en personas que llevan camisetas de colores o que navegan por Internet con identidades falsas. Incluyen asesinatos selectivos de líderes enemigos, operaciones de bandera falsa, terrorismo y más cosas oscuras y funestas dirigidas contra el Gobierno del enemigo. Hay pocas dudas de que las operaciones psicológicas tienen un futuro brillante y los resultados de la lucha son inciertos pero, al menos hasta ahora, no implican víctimas humanas. Se trata de una verdadera "batalla de memes" que aparecen, crecen y luego se derrumban en el ciberespacio. Es imposible decir adónde nos llevará esta línea de conflicto: quizá las batallas virtuales reduzcan la violencia real, o quizá los estragos que causan la empeoren. Como de costumbre, no se puede predecir el futuro: hay que esperar a que se convierta en el presente.

En materia militar, también puede existir una estrategia "anti-Séneca". Consiste en hacer caso omiso del principio de Sun Tzu del mínimo esfuerzo en la guerra y aspirar, en cambio, a continuar la guerra hasta la completa derrota militar o, incluso, la aniquilación del enemigo. Este plan puede basarse en consideraciones ideológicas, políticas o religiosas que llevan a uno o a ambos bandos a creer que la propia existencia del otro es una amenaza mortal que debe ser eliminada por la fuerza. En otros tiempos, el odio religioso llevó al exterminio de poblaciones enteras y hay una declaración bastante conocida

que podría haberse pronunciado tras la caída de la ciudad de Béziers, en el sur de Francia, en 1209. Se dice que al legado papal que estaba con las tropas católicas atacantes se le preguntó qué hacer con los ciudadanos de Béziers, entre los que seguramente había católicos y herejes albigenses. La respuesta fue: "Matadlos a todos, Dios conocerá a los suyos". Esa guerra, al igual que la mayoría de las guerras modernas, fue una "guerra de identidad" en la que el enemigo es visto no solo como un adversario, sino como una entidad maligna que debe ser destruida. Estas guerras suelen ser brutales y se prolongan hasta el exterminio total del bando perdedor. En algunos casos, las guerras pueden prolongarse porque son un buen negocio para algunas personas y empresas de ambos bandos.

Un posible caso reciente de este tipo de estrategia "anti-Seneca" puede encontrarse en la campaña que se inició en Estados Unidos en 1914 para proporcionar alimentos a Bélgica durante la Primera Guerra Mundial. La campaña se describe normalmente como un gran éxito humanitario, pero en el reciente libro Pro*longing the Agony (20*18), los autores, Docherty y Macgregor, sugieren que el esfuerzo humanitario era solo la fachada de la verdadera tarea de la operación: suministrar alimentos a Alemania para que el ejército alemán pudiera seguir luchando hasta su completa destrucción. Esto parece ser principalmente una especulación, sin embargo, Bélgica estaba ocupada por el ejército alemán en ese momento, por lo que se podía esperar que al menos parte de los alimentos enviados allí terminaran en manos alemanas. Pero también es cierto que, en el momento de la campaña, Estados Unidos no estaba en guerra con Alemania, por lo que la operación podría describirse simplemente como un negocio lucrativo para los agricultores estadounidenses que encontraron una forma de vender alimentos a Alemania de esta manera bastante indirecta.

Algo más siniestro ocurrió durante la Segunda Guerra Mundial. En septiembre de 1943, tras la rendición de Italia, todo el mundo debía tener claro que los aliados habían ganado la guerra y que solo era cuestión de tiempo que terminaran el trabajo. Entonces, ¿qué podría haber impedido que el Gobierno alemán siguiera el ejemplo de Italia y se rindiera, tal vez expulsando a Hitler como el Gobierno italiano había hecho con Mussolini? No sabemos si algunos miembros de la cúpula alemana se plantearon esta estrategia, pero parece claro que los aliados no los animaron. Un mes después de la rendición

de Italia, en octubre de 1943, Roosevelt, Churchill y Stalin firmaron un documento conocido como la Declaración de Moscú. Entre otras cosas, decía que:

> En el momento de la concesión de cualquier armisticio a cualquier Gobierno que pueda establecerse en Alemania, aquellos oficiales y hombres alemanes y miembros del partido nazi que hayan sido responsables o hayan tomado parte consentida en las atrocidades, masacres y ejecuciones antes mencionadas serán enviados de vuelta a los países en los que se realizaron sus abominables actos [...] y juzgados in *situ po*r los pueblos a los que han ultrajado.
>
> [...] con toda seguridad las tres potencias aliadas los perseguirán hasta el último confín de la tierra y los entregarán a sus acusadores para que se haga justicia. [...] (si no) serán castigados por decisión conjunta del Gobierno de los aliados.

¿Cuál era el objetivo de difundir este documento que amenazaba con el exterminio de los dirigentes alemanes sabiendo que también lo leerían los alemanes? Los aliados parecían querer asegurarse de que los dirigentes alemanes entendieran que no había espacio para negociar un armisticio. La única salida que les quedaba a los militares alemanes era tomar las riendas de la situación para deshacerse de los líderes que los aliados habían prometido castigar. Esa fue probablemente la razón del intento de asesinato llevado a cabo contra Adolf Hitler el 20 de julio de 1944. Fracasó y nunca sabremos si habría acortado la guerra.

Tal vez como reacción al intento de asesinato de Hitler, el 21 de septiembre de 1944 los aliados difundieron públicamente un plan para la Alemania de posguerra que había sido aprobado por los Gobiernos británico y estadounidense (Beschloss, 2002). El plan, conocido como "Plan Morgenthau", fue propuesto por Henry Morgenthau Jr., secretario del Tesoro de Estados Unidos. Entre otras cosas, exigía la destrucción completa de la infraestructura industrial de Alemania y la transformación de este país en una sociedad puramente agrícola con un nivel tecnológico casi medieval. Si se llevara a cabo tal como estaba previsto, el plan habría acabado con millones de alemanes, ya que la agricultura alemana, por sí sola, habría sido incapaz de mantener a su población.

A diferencia de la declaración de Moscú, que pretendía castigar a los dirigentes alemanes, el plan Morgenthau exigía el castigo de toda la población alemana. Una vez más, los proponentes debían ser conscientes de que su plan era visible para los alemanes y que el Gobierno alemán lo utilizaría como herramienta de propaganda. El yerno del presidente Roosevelt, el teniente

coronel John Boettiger, declaró que el Plan Morgenthau "valía treinta divisiones para los alemanes" (Beschloss, 2002). La agitación general contra el plan entre los dirigentes estadounidenses llevó al presidente Roosevelt a desautorizarlo. Pero puede haber sido una de las razones que llevaron a los alemanes a luchar hasta el final.

Entonces, ¿cuál era la idea que estaba detrás del plan Morgenthau? Como puedes imaginar, la historia generó una serie de teorías conspirativas. Una de estas teorías propone que el plan no fue concebido por el propio Morgenthau, sino por su secretario adjunto, Harry Dexter White (Unz, 2018). Después de la guerra, White fue acusado de ser un espía soviético por la investigación Venona, un esfuerzo de contrainteligencia estadounidense iniciado durante la Segunda Guerra Mundial (Haynes, 2000) que fue el preludio de la conocida "caza de brujas" llevada a cabo por el senador Joseph McCarthy en la década de 1950. Según una interpretación posterior (Unz, 2018), White había actuado bajo instrucciones del propio Stalin, que quería que los alemanes sufrieran tanto bajo la ocupación aliada, que dieran la bienvenida a una intervención soviética. No hace falta decir que esto es solo una especulación, pero como este capítulo trata del lado malo del colapso, esta historia encaja muy bien en él.

Al final, no hay pruebas de que el plan Morgenthau hubiera sido concebido por personas malvadas reunidas en secreto en una habitación llena de humo. Por el contrario, tiene cierta lógica si se examina desde el punto de vista de las personas que participaban en el esfuerzo bélico contra Alemania en la década de 1940. Habían visto cómo Alemania reconstruía su ejército y reiniciaba su esfuerzo bélico para conquistar Europa apenas veinte años después de haber sido derrotada de una forma que parecía final en 1918. No es de extrañar que quisieran asegurarse de que no pudiera volver a ocurrir. Pero según su experiencia, no bastaba con derrotar a Alemania para obtener ese resultado: ningún tratado de paz, por duro que fuera para los perdedores, podía conseguirlo. La única manera de acabar para siempre con las ambiciones de conquista alemanas era mediante la destrucción completa de las fuerzas armadas alemanas y la ocupación de toda Alemania. Para ello, las fuerzas alemanas debían luchar como ratas acorraladas y ser exterminadas. Y parece razonable que si se quiere que una rata luche de esa manera, hay que acorralarla primero. El plan Morgenthau no dejaba ninguna esperanza a los alemanes, excepto en términos de una lucha desesperada hasta del último hombre. No sabemos si las personas que concibieron el plan lo vieron en estos

términos. Los documentos que tenemos parecen indicar que había un fuerte sentimiento entre las personas del Gobierno estadounidense durante la guerra sobre la necesidad de castigar a Alemania y a los alemanes, como se describe, por ejemplo, en el libro de Beschloss Los *conquistadores (2002)*. Sea como fuere, afortunadamente, el plan Morgenthau nunca se adoptó oficialmente y en 1947 Estados Unidos cambió su enfoque de destruir Alemania por el de reconstruirla mediante el plan Marshall.

Ha habido otros casos de guerras en los que no se intentó aplicar la sabia estrategia propuesta por Sun Tzu, que sugiere dejar siempre al enemigo una vía de escape. Hoy en día, las guerras parecen ser cada vez más polarizadas y letales, al igual que el debate político. Y eso las hace más destructivas: una vez iniciada la guerra, hoy en día, la única forma de concluirla parece ser el colapso total del enemigo y el exterminio de sus dirigentes. Las risas de Hillary Clinton, entonces secretaria de Estado de Estados Unidos, ante la noticia de la muerte del líder de Libia, Muamar el Gaddafi, en 2011, son un ejemplo de lo brutales y crueles que se han vuelto estos enfrentamientos. Es difícil pensar en cómo se puede invertir la tendencia en esta dirección mientras no se derrumbe el actual sistema internacional de interacción entre Estados que la creó. Al menos, debería quedar claro que la estrategia anti-Séneca es una forma especialmente ineficaz de ganar guerras.

Para concluir esta sección sobre los aspectos malignos del precipicio de Séneca, podemos examinar el tema del engaño y la traición como herramientas para evitar la ruina. La mentira es seguramente un arte muy antiguo, ¿puede utilizarse para provocar el hundimiento de un enemigo o de un competidor? Sobre este punto existe una historia paradigmática: la de los dos hombres desarmados que se encontraron frente a un león hambriento en algún lugar de África. Mientras uno de los dos empieza a ponerse tranquilamente las zapatillas para correr, el otro le pregunta: "¿Por qué haces eso? ¿No sabes que el león puede correr más rápido que tú aunque lleves esos zapatos?". El primer hombre responde: "No necesito correr más rápido que el león, solo necesito correr más rápido que tú".

Esta historia es una de las muchas versiones narrativas del concepto de que en algunas condiciones se puede optimizar la ganancia de una persona asegurando la pérdida de otra y eso puede implicar el engaño y la traición. En los estudios sobre el comportamiento humano, la colaboración suele ser el

centro de atención (Marsh, 2013), pero también existe una literatura científica sobre la traición. Gran parte de este trabajo se ha realizado a partir de estudios de casos, véase por ejemplo el libro Bet*rayal and Betrayers de* Malin Akerstrom (2017). Otro método muy conocido es el de los juegos operacionales, en los que la traición se estudia en el marco de la optimización de los beneficios de los jugadores en diferentes situaciones. En este campo, se encuentran el "juego del dictador", el "juego del ultimátum", el "juego de la confianza", todos ellos forman parte del campo conocido como "teoría de los juegos", desarrollado originalmente por figuras como John Nash y John Von Neumann (véase, por ejemplo, el libro de Myerson, Gam*e Theory [19*97]). Además, por supuesto, la traición desempeña un papel fundamental en muchos juegos de mesa competitivos, quizás, el ejemplo más antiguo es Dip*lomacy, u*n juego estratégico creado por Allan B. Calhamer en la década de 1950. En Dip*lomacy, a*l igual que en muchos juegos de mesa estratégicos, los jugadores asumen el papel de líderes comprometidos con el dominio local o mundial.

El campo de la teoría de juegos, y también de los juegos de mesa, es muy amplio, pero podemos limitarlo a aquellas decisiones que afectan a la posibilidad de un colapso. En otras palabras, ¿cuándo es conveniente traicionar a alguien para minimizar o evitar el propio colapso? Un buen ejemplo es el conocido "juego del prisionero" (1970). Así lo describió Poundstone en 1992:

> Dos miembros de una banda criminal son detenidos y encarcelados. Cada preso está en régimen de aislamiento sin poder comunicarse con el otro. Los fiscales carecen de pruebas suficientes para condenar a la pareja por el cargo principal, pero tienen las suficientes para condenar a ambos por un cargo menor. Al mismo tiempo, los fiscales ofrecen a cada preso un acuerdo. Cada prisionero tiene la oportunidad de traicionar al otro testificando que el otro cometió el crimen o de cooperar con el otro permaneciendo en silencio.

En el juego, la traición aporta beneficio a uno de los jugadores solo si el otro decide cooperar. Si ambos desertan, ambos sufren fuertes penalizaciones. Y si ambos cooperan no traicionando al otro, solo sufren penalizaciones menores. En principio, la mejor estrategia en general es la de cuando los jugadores colaboran entre sí, pero no pueden saber qué hará el otro y pueden estar tentados a desertar, esperando que el otro sea lo suficientemente ingenuo como para colaborar.

El juego del dilema del prisionero no tiene una estrategia óptima. Los estudios empíricos muestran que la estrategia simple llamada "ojo por ojo" es la que mejor funciona si el juego se realiza varias veces con los mismos jugadores. Es decir, cada jugador coopera o deserta en función de lo que haya hecho el otro en la ronda anterior del juego. En esta versión, el comportamiento de un jugador se basa en lo que percibe como reputación del otro. Pero no hay ninguna garantía de que esta estrategia suponga siempre un beneficio a quien la adopta. Además, ¿qué hacer cuando se juega contra alguien cuya reputación no se conoce? Así, el juego refleja la complejidad e imprevisibilidad del mundo real.

El juego del prisionero implica la traición, pero no el engaño: no se miente a cada uno de los implicados. Algo similar ocurre en la historia del león y los dos hombres: tampoco hay engaño. A partir de los datos conocidos, cada jugador calcula las probabilidades de dos estrategias posibles: luchar juntos contra el león o huir. Aquí no hay un verdadero "juego", ya que existe una estrategia óptima obvia: el hombre que cree que es más rápido huye solo, dejando al más lento enfrentarse a su precipicio personal de Séneca en forma de un león hambriento. Pero en la vida real, el engaño suele ser un elemento fundamental de la interacción entre los seres humanos.

Podemos introducir el engaño en las reglas de estos juegos. En la historia del león y los dos hombres, ¿qué pasa si solo uno de los dos sabe que el león se acerca? Esta es una versión del juego al que llamé "el dilema del campista" en 2017 (Bardi, 2017). Lo describí en términos de un oso que amenaza a dos campistas desarmados, pero la historia es la misma cuando se trata de un león o cualquier otra criatura peligrosa. La esencia del juego es decidir cuál es la mejor estrategia para sobrevivir cuando uno de los jugadores descubre que un león, o un oso, hambriento está cerca. ¿Es mejor intentar sobrevivir solo o cooperar con el otro campista? Depende de la situación. Imaginemos que has visto al oso cuando estabas buscando bayas mientras el otro campista estaba cerca de la tienda. Lo que hagas depende de la gravedad de la amenaza (o de lo que se perciba como tal). Tal vez el oso que viste estaba lejos o tal vez era un oso pequeño, poco propenso a atacar a dos seres humanos que luchan juntos. Entonces, la mejor estrategia es la colaboración.

Pero ¿y si el oso está cerca y es un oso pardo, tan grande que no tienes ninguna esperanza de sobrevivir a un combate, ni siquiera si unes fuerzas con tu compañero de acampada? En este caso, tu mejor oportunidad para

sobrevivir es el engaño. Le dices a tu amigo que vas a dar un paseo para recoger fresas y, en cuanto te pierdes de vista, empiezas a correr. Tu amigo hará lo mismo cuando aparezca el oso pardo, pero tú tienes una buena ventaja y puede que seas capaz de sobrevivir a esta miniestampida.

El juego del "dilema del campista" muestra que hay situaciones en las que el conocimiento asimétrico hace conveniente la traición ante una posible catástrofe. Es una condición que bien puede aplicarse a situaciones del mundo real. Permíteme poner un ejemplo: en 2017, apareció un artículo en The *Guardian ti*tulado, "Necesitamos de*s*arrollo: Maldivas cambia el enfoque de la amenaza climática al turismo de masas":

> Esta semana, Maldivas, bajo el nuevo presidente Abdulla Yameen, ha cambiado aparentemente de rumbo en materia de medioambiente, afirmando que el turismo de masas y los megaproyectos, en lugar de la energía solar y la neutralidad del carbono, le permitirán adaptarse al cambio climático y dar a su joven población esperanzas para el futuro.
>
> Los temores sobre el aumento inmediato del nivel del mar, que según los científicos del último informe del IPCC, se está acelerando y podría suponer que el 75% de las Maldivas quedara bajo el agua en 2100, son infundados, dijo Adam. "No va a ocurrir el año que viene. Tenemos necesidades inmediatas. El desarrollo debe continuar, se necesitan puestos de trabajo, tenemos las mismas aspiraciones que la gente de Estados Unidos o Europa".

Como primera impresión, estas declaraciones suenan a pura locura. Las Maldivas son islas que surgen del mar sobre arrecifes de coral de no más de un par de metros de media. Hasta ahora, han podido sobrevivir a una subida del nivel del mar del orden de centímetros y no hay pruebas de que corran un riesgo inmediato de hundirse (Bardi, 2018). Pero el ritmo de subida del nivel del mar se está acelerando (Nerem et *al.,* 2018) y ¿cuánto tiempo podrán aguantar las islas de coral? Nadie puede asegurarlo, pero es muy posible que sucumban en un futuro no lejano, ya que, por lo que sabemos, las islas nunca han experimentado el tipo de cambio rápido del nivel del mar que el calentamiento global va a generar en un futuro próximo (Kench, McLean y Nichol, 2005). Y no es necesario que las islas queden completamente sumergidas para que sus habitantes sufran grandes daños. Las islas de coral son un lugar muy malo para experimentar inundaciones: no hay terrenos altos en los que refugiarse.

Así pues, hay buenas razones para que la gente que vive en estas islas esté preocupada, pero al Gobierno maldivo no parece importarle porque planea construir un superresort al estilo de la Riviera con deportes marítimos, hoteles

de seis estrellas, viviendas de alta gama y varios aeropuertos nuevos y planea aumentar el turismo de 1,3 millones de personas al año a más de siete millones en 10 años. ¿Será este un caso como el descrito por el refrán "a quien los dioses quieren destruir primero lo hacen enloquecer"?

Las Maldivas no son el único archipiélago en el que los dirigentes locales han decidido ignorar la amenaza del calentamiento global. Algo parecido ocurre en las islas Kiribati, otro archipiélago de islas coralinas en el océano Pacífico. Según un artículo aparecido en las noticias de la CBS en noviembre de 2017, el gobierno de Kiribati:

> [...] proclama el objetivo de promover el turismo atrayendo a inversores extranjeros para que desarrollen "centros turísticos ecológicos de 5 estrellas que promuevan experiencias de buceo, pesca y surf de categoría mundial" en islas actualmente deshabitadas. Dice que el plan nacional de 20 años "tiene el ambicioso objetivo de transformar Kiribati en el Dubái o el Singapur del Pacífico".

Estoy seguro de que los acontecimientos que se están produciendo en las Maldivas y en las islas Kiribati os recuerdan al giro político similar para hacer frente al cambio climático que se produjo en Estados Unidos en 2016, a pesar de que este país no está bajo la amenaza de ser inundado por las olas. Más recientemente, una evolución similar tuvo lugar en Brasil con la elección de Jair Bolsonaro como presidente en 2019. Entre otras cosas, el nuevo presidente amenazó con que Brasil abandonara el Acuerdo de París, al igual que hizo Estados Unidos con el presidente Trump.

¿Por qué la gente empieza a negar la amenaza a medida que se acerca? Puede haber razones psicológicas profundas para ello, pero yo podría proponer una interpretación diferente. Tiene que ver con el hecho de que, mientras que a nivel individual solo puedes engañarte a ti mismo cuando te enfrentas al precipicio de Séneca, a nivel colectivo o político tienes la posibilidad de engañar a otras personas y si eres un miembro de la élite, puedes decidir engañar a los plebeyos para salvarte.

He aquí un ejemplo histórico reciente de cómo las élites engañan a los ciudadanos. En 1943, durante la Segunda Guerra Mundial, los altos mandos italianos llevaban meses negociando la rendición de Italia a los aliados en completo secreto. Hasta el último momento, la verdad oficial fue que no habría rendición y que el superior espíritu de lucha del pueblo italiano triunfaría, sin importar la superioridad de los aliados en términos de materiales y mano de

obra. Entonces, cuando se hizo pública la rendición, el 8 de septiembre de 1943, el rey de Italia y los principales generales se salvaron refugiándose con los aliados mientras el ejército se dejaba "comer por el león", en este caso, el ejército alemán.

Ahora, volvamos a los casos de los archipiélagos de Maldivas y Kiribati. Imagina que formas parte de la élite de las islas y que eres lo suficientemente inteligente como para entender lo que ocurre con el clima de la Tierra. Sabes que es poco probable, por no decir nada probable, que las personas ricas renuncien a sus brillantes todoterrenos por el bien de un grupo de desgraciados que viven en unas islas remotas. Entonces, ¿qué es lo más racional que puedes hacer? Por supuesto, vender lo que tienes y despedirte de los que se quedan. Eso implica, por supuesto, que no debes decirle a nadie que temes que las islas se hundan. Al contrario, debes preparar grandes planes de desarrollo como si estuvieras seguro de que las islas se mantendrán a flote para siempre. Luego, cuando las cosas empiecen a ir mal, tendrás la oportunidad de irte y llevar tus cuentas bancarias al continente. Los pobres se quedarán atrapados donde están, para ellos, el precipicio de Séneca termina bajo el agua.

Los casos de las islas pequeñas no son aislados, solo más evidentes que otros. Mira lo que hace Donald Trump: resta importancia al cambio climático en favor del desarrollo económico, justo lo que hacen los Gobiernos de Kiribati y Maldivas. Si las élites estadounidenses han decidido que no hay esperanza de salvar a todo el mundo, lo lógico es que pasen al "modo trampa" y dejen que la mayoría de la gente muera no solo por la subida del nivel del mar, sino de hambre, enfermedades y otras consecuencias del cambio climático. Eso les da tiempo para prepararse, acumulando recursos para la emergencia que se avecina. Desgraciadamente, esta estrategia particular para lidiar con sistemas complejos bajo estrés tiene una lógica perversa y si esta interpretación es correcta, las élites de la mayor parte del mundo desarrollado pronto seguirán su ejemplo en la negación del cambio climático. Solo tenemos que esperar y ver.

EVITAR LA SOBREEXPLOTACIÓN: ¡PERFORA, PEQUEÑO, PERFORA!

En 2008, Sarah Palin, entonces candidata republicana a la vicepresidencia, participó en un debate televisivo con su oponente demócrata, Joe Biden. En el

debate se abordó la cuestión del cambio climático y los recursos energéticos, y Biden declaró que:

> Veamos los hechos. Tenemos el 3% de las reservas mundiales de petróleo. Consumimos el 25% del petróleo del mundo. John McCain ha votado 20 veces en la última década y media en contra de la financiación de fuentes de energía alternativas, fuentes de energía limpia, eólica, solar, biocombustibles (The *New York Times, 2*008).

A los políticos les gusta afirmar que les importan los hechos, salvo que lo que ellos llaman "hechos" son a menudo más su interpretación de la realidad que la realidad en sí misma. Pero en este caso, Biden estaba informando de datos razonablemente correctos para 2008, cuando el boo*m de* la producción de petróleo de esquisto en Estados Unidos apenas había comenzado.

Y aquí está la respuesta de Sarah Palin:

> La consigna es "perfora, pequeño, perfora". Y eso es lo que oímos en todo el país en nuestros mítines, porque la gente está deseando que se aprovechen esas fuentes de energía nacionales. Saben que incluso en mi propio estado productor de energía tienen miles de millones de barriles de petróleo y cientos de billones de pies cúbicos de gas natural limpio y ecológico.

Sarah Palin no aportó ningún dato, salvo hablar del "cántico" perfora, pequeño, perfora, un hechizo mágico, un encantamiento, un exorcismo. En cuanto a los hechos, solo proporcionó vagas estimaciones utilizando palabras rotundas en términos de "miles de millones de barriles" y "billones de pies cúbicos".

Así funciona la política: utilizando la magia en lugar de los hechos para convencer a la gente. Todo ello forma parte de una tendencia en curso en la política: en las últimas décadas el discurso político se ha vuelto más emocional y menos basado en hechos, girando en torno a la capacidad del gran hombre en la cima (raramente la gran mujer) de parecer convencido y tranquilizador. Es una tendencia que se describe en un reciente artículo de Jordan et *al. (*2019) como:

> A través de múltiples corpus de los presidentes estadounidenses, líderes no estadounidenses y órganos legislativos que abarcan décadas, se ha producido un declive general del pensamiento analítico y un aumento de la confianza en la mayoría de los contextos políticos, encontrándose los cambios más acusados y consistentes en la presidencia estadounidense.

El equipo Palin-McCain fue derrotado por el equipo Biden-Obama en 2008, pero eso cambió poco el hecho de que la propuesta de Palin de perforar

más superó la idea de Biden de pasar a las renovables. En política, una de las principales reglas para obtener el éxito es que "todos los cambios que propongas deben tener el propósito de evitar el cambio". Biden proponía pasar a las energías limpias, lo cual significaba un cambio real y eso es algo que no se puede hacer en política. Palin no proponía ningún cambio, salvo quizás cantar algún mantra todos juntos. Esa era una estrategia ganadora en términos políticos. Afortunadamente para el equipo Obama-Biden, el cambio climático y la energía siguieron siendo temas marginales en el debate.

La idea de perforar más ya estaba en marcha antes de las elecciones de 2008 y fue ganando terreno progresivamente. El mundo financiero proporcionó recursos para que la industria se comprometiera a realizar un gran esfuerzo para extraer más petróleo y eso podría hacerse explotando los depósitos de esquisto. Se trata de un tipo de petróleo contenido en la matriz de la roca en burbujas no interconectadas entre sí, por lo que el gas o el líquido no pueden fluir espontáneamente hacia la superficie una vez perforada la roca. Para obtener el petróleo, es necesario crear una vía para que el petróleo fluya mediante la fracturación de la roca (o fra*cking, c*omo se puso de moda decir en los últimos tiempos). En los viejos tiempos de la industria petrolera, se decía que se podía hacer lanzando un cartucho de dinamita encendido en el pozo, hoy en día se realiza inyectando fluidos a alta presión dentro de la roca. No cambia tanto la idea básica, aunque el cartucho de dinamita era probablemente más espectacular.

A pesar de la complejidad y del elevado coste del fra*cking, e*n pocos años la industria petrolera estadounidense consiguió invertir la tendencia a la baja que se venía produciendo desde la década de 1970. En la década de 2010, la perforación se convirtió cada vez más en la sabiduría aceptada, mientras las energías renovables pasaban gradualmente de moda o quedaban relegadas a algunas regiones marginales del debate, mientras la mayoría de los políticos se dedicaban a nuevos eslóganes mágicos como "carbón limpio" y "crecimiento verde". La consigna de "perfora, pequeño, perfora" triunfó y el problema del agotamiento del petróleo parecía haber sido empujado a un futuro tan remoto que ya nadie tendría que preocuparse por ello. Con el tiempo, este cántico de Palin de 2008 se transformó en el llamado hoy "dominio de la energía", otro eslogan mágico utilizado por primera vez por Donald Trump en 2017. Un concepto interesante: es como si pudieras dominar a tus vecinos quemando tu

casa más rápido que ellos. Pero qué más da la lógica de eso: ¿no estamos tratando con magia?

La extracción de petróleo de esquisto puede ser descrita como "mágica" por los políticos, pero sin duda es una tecnología compleja y costosa. Para dar una idea de las dificultades que entraña, obsérvese cómo un reciente artículo de Stephen Chen (2019), procedente de China, informa de cómo podrían utilizarse las tecnologías de las armas nucleares para movilizar los hidrocarburos atrapados en los depósitos de esquisto. No es que el plan sea detonar ojivas nucleares con ese fin, pero el dispositivo descrito en el artículo, llamado "barra de energía", es capaz de crear ondas de choque que fracturan la roca subterránea. Aparte de sonar un poco como el bastón de Gandalf el Blanco en la trilogía de Tolkien, parece ser una variante especialmente cara y complicada de la vieja idea de lanzar cartuchos de dinamita en el pozo. Dados los costes y las dificultades, no podemos decir cuánto durará el boo*m de*l esquisto. Lo que sí podemos decir es que, hasta ahora, la industria del esquisto no ha proporcionado grandes beneficios a los inversores (Berman, 2018). Entonces, ¿durante cuánto tiempo puede seguir la industria así? Es posible que el precipicio de Séneca para la industria del petróleo de esquisto no esté muy lejos en el futuro. En política, la magia siempre gana a la realidad, pero solo por un tiempo.

El debate entre Palin y Biden es un buen punto de partida para discutir una cuestión muy general: ¿cómo debemos gestionar los recursos naturales de la Tierra? ¿Podemos realmente seguir creciendo para siempre, como parecen insinuar la mayoría de los políticos? ¿O nos enfrentamos al precipicio de Séneca en toda nuestra civilización cuando empecemos a quedarnos realmente sin los recursos que la crearon?

Todos los recursos naturales son escasos por definición: si no lo fueran, serían gratuitos. Por eso no pagas por el oxígeno que respiras ni por la luz del sol que entra por la ventana (al menos hasta ahora). Pero el petróleo, el gas, el oro, las ballenas, el grano y el caribú son ejemplos de recursos limitados, un concepto bien conocido en economía. Los economistas suelen coincidir en un concepto llamado "teoría del equilibrio general" que implica que si la demanda supera a la producción, los precios subirán, reduciendo la demanda y/o generando nuevas inversiones que aumentarán la producción. En ambos casos, se restablece el equilibrio. Lo contrario ocurre si la producción supera a

la demanda.

Estos conceptos se consideran probados dentro de los supuestos en los que se basa la economía moderna, pero ¿son ciertos en el mundo real? Kate Raworth señala en su libro *Doughnut Economics (2017)* que los primeros economistas se apoyaron en el prestigio de Newton para hacer que las "leyes" de la economía parecieran leyes físicas, similares a las leyes que rigen el movimiento de los planetas. Raworth señala:

> Algo que está claramente llegando a su fin es la credibilidad de la economía general de la equidad. Sus metáforas y modelos fueron concebidos para imitar la mecánica newtoniana, pero el péndulo de los precios, los mecanismos de mercado y el fiable retorno al reposo simplemente no sirven para entender el comportamiento de la economía. ¿Por qué no? Es simplemente el tipo de ciencia equivocado (Raworth, 2017: 135).

Raworth quiere decir que la mecánica newtoniana es perfectamente adecuada para describir los movimientos de los cuerpos en un campo gravitatorio como una aproximación que conduce naturalmente a una condición de equilibrio. Pero el sistema económico no está en equilibrio. Puede estar en homeostasis, una condición que puede parecerse al equilibrio pero que es un concepto completamente diferente. Es bien sabido que el mercado atraviesa ciclos de crecimiento y declive, y que los precios normalmente oscilan, a veces de forma salvaje, algo que la física del equilibrio no puede describir. La física y la economía se parecen un poco al ajedrez y al *paintball:* ambos son juegos que simulan batallas reales, pero con reglas muy diferentes.

El problema es más evidente cuando hablamos de recursos no renovables. Cuando Sarah Palin promovía su consigna de "perfora, pequeño, perfora", quería decir que todas las empresas petroleras deberían esforzarse por maximizar tanto la producción como las ganancias. Pero si el petróleo es un recurso no renovable, perforar más solo conducirá a que se agote más rápidamente, aunque los operadores puedan disfrutar de una efímera abundancia. La razón por la que el agotamiento se ha dejado de lado en el debate se debe en gran parte a la tendencia humana de ignorar el futuro, es decir, a pensar que un huevo hoy es mejor que una gallina en el futuro. Este es un gran problema y parece que para la mayoría de la gente los acontecimientos que se espera que ocurran dentro de más de cinco años no se consideran importantes.

Sin embargo, los economistas no se limitan a decir a la gente "comed el huevo mientras lo tengáis", por el contrario, hace aproximadamente un siglo, los economistas empezaron a pensar en el problema del agotamiento. La idea básica que parece seguir vigente en este campo es que la eficiencia del mercado en la asignación de los recursos escasos debería ser capaz de ocuparse también de optimizar la explotación de los no renovables. Así, a medida que los productores agotan una reserva, el mercado omnisciente percibe la creciente escasez y reacciona aumentando el precio del producto. Esto permite a los productores mantener su producción a pesar de los mayores costes, mientras buscan nuevos recursos que pueden ser del mismo tipo, pero más caros de producir, o completamente diferentes, posiblemente renovables. Según un modelo desarrollado por primera vez por Harold Hotelling en 1931, el resultado será una sustitución suave del recurso agotado por uno nuevo, denominado "recurso de reserva".

Se puede objetar que es un acto de fe el pensar que siempre habrá algo disponible para sustituir un recurso que se ha vuelto demasiado caro para ser utilizado. De hecho, en muchos casos la creencia de la disponibilidad de sustituciones se basa en una fe bastante ingenua en el progreso tecnológico. Pero también es cierto que muchos recursos escasos pueden ser sustituidos por otros menos escasos. En los últimos siglos, el carbón ha sustituido a la madera, el petróleo al carbón, el gas natural puede sustituir al petróleo. Y podemos sustituir el cobre por el aluminio, el zinc por el titanio, el plástico por el bioplástico, etc.

Esta línea de razonamiento ha dado lugar a algunas valoraciones demasiado optimistas en el pasado, como el "principio de sustituibilidad infinita" propuesto en 1978 por Goeller y Weinberg, basado principalmente en lo que parecía ser una promesa de energía barata y abundante obtenida de la energía nuclear. Hoy en día tendemos a ser menos optimistas, pero también es cierto que la escasez física, en sí misma, no es un problema irresoluble: la sustitución, el reciclaje, la eficiencia, la reestructuración son estrategias que pueden utilizarse para luchar contra el agotamiento de los recursos minerales. Al fin y al cabo, el ser humano difícilmente puede autoexplotarse: todo lo que extrajimos en el pasado no ha desaparecido, está en algún lugar y permanecerá para siempre con nosotros. Por lo tanto, nada nos impide utilizar la misma estrategia que han empleado las plantas para "minar" la corteza durante cientos de millones de años sin que se agotara nada. ¿Cómo lo han

conseguido? Basándose en tres principios fundamentales: 1) utilizar solo lo que es abundante, 2) utilizar lo menos posible y 3) reciclar ferozmente.

Funcionó para las plantas y sigue funcionando para toda la biosfera, pero ¿podríamos hacer lo mismo con nuestro sistema industrial? No es fácil, por supuesto, pero no hay razones físicas para que no se pueda hacer. Algunas personas entienden mal el segundo principio de la termodinámica y se plantean que como se supone que la entropía aumenta siempre, nunca será posible reciclar completamente los minerales. Pero el segundo principio solo funciona para sistemas aislados y nuestro planeta no lo es, por eso las plantas han podido reciclar todo durante tanto tiempo. El problema del reciclaje no es la termodinámica, sino el coste, y es difícil pensar que la deidad llamada "mercado libre" vaya a llevar a cabo el milagro por nosotros sin ningún dolor. Pasar al 100% del reciclaje implica renunciar a la actual "subvención energética" que millones de años de luz solar y otras fuerzas han acumulado en los minerales: tendremos que pagar el precio de esta energía nosotros mismos y eso implica un replanteamiento completo de la forma en que extraemos, utilizamos y reciclamos los minerales. Un cambio de actitud que parece muy improbable si se tiene en cuenta que el gobierno de Estados Unidos parece haber abrazado plenamente la idea de que la forma de afrontar el agotamiento del petróleo es extraer lo que queda a la mayor velocidad y en la mayor cantidad posible, sin pensar —ni siquiera vagamente— en la necesidad de invertir en un sustituto para el futuro. Tenemos mucho que aprender en este campo.

¿Pero qué pasa con los recursos renovables? En principio, podemos seguir produciendo recursos biológicos —madera, grano, alimentos, fibra y otros— mientras haya luz solar para alimentar el proceso de fotosíntesis, ¿no es así? Por desgracia, también tenemos un problema de agotamiento con los recursos renovables, un problema que puede ser incluso peor que el de los no renovables. El ser humano es tan bueno explotando recursos que tiende a destruirlos, creando una escasez que, en sí misma, no tendría por qué existir.

Se trata de una historia que se remonta a tiempos muy antiguos. Pensemos en cómo los indios americanos mataban a los bisontes empujándolos por un acantilado y asegurándose de que no sobreviviera ni uno solo, como cuentan Lewis y Clark en el informe de su expedición de 1804-1806. La idea de que la mejor manera de conseguir un filete de bisonte para la cena es exterminar a toda una manada no parece la más eficiente, pero esta actitud puede haber sido típica de nuestros remotos antepasados. De hecho, a menudo se acusa a los

humanos de haber sido la causa del impulso de extinciones de "megafauna" (criaturas que pesan más de 100 libras o 44 kg) observado hace unos 10.000 años (Doughty, Wolf y Field, 2010). Se trata de un punto controvertido y hay otras posibles causas de las antiguas extinciones, pero también es cierto que tenemos pruebas históricas directas de como las prácticas modernas de caza derrochadora condujeron a la casi —o total— extinción de grandes animales. Si se lee *Moby Dick*, de Melville, seguro que uno se da cuenta de que los balleneros del siglo XIX mataban a las ballenas para obtener solo unos pocos litros del aceite de esperma de ballena que contenían sus grandes cabezas, el resto lo tiraban a excepción de unos pocos trozos, como cuando leemos que el primer oficial Starbuck se comía un filete de ballena en la cubierta del Pequod. Desde la época de la caza de ballenas, las cosas no han cambiado tanto y no hemos aprendido realmente a gestionar la explotación de las criaturas marinas. Tras haber estado a punto de quedarnos sin varias especies de ballenas (Scott Baker y Clapham, 2004), ahora corremos el riesgo de quedarnos sin criaturas mucho más pequeñas, como los calamares (Demetrion, 2019).

¿Por qué las personas siguen destruyendo los recursos que les permiten vivir? Se dice que Gandhi dijo que "la Tierra proporciona lo suficiente para satisfacer las necesidades de todos los hombres, pero no la codicia de todos los hombres". Esta afirmación no significa que los seres humanos puedan aumentar su número para siempre, sino que un sistema ecológico basado en la codicia siempre creará necesidades que la Tierra no podrá satisfacer. Desgraciadamente, la idea de que la codicia es buena está consagrada en el pensamiento económico actual y los economistas parecen haber tardado en detectar el enorme agujero que hay en la base de sus opiniones.

Ahí es exactamente donde radica el problema: se llama "rebasamiento" y ya vimos su descripción anteriormente en este libro. Cuanto más se sobredimensiona, más difícil es "volver" a un caudal muy inferior a la capacidad de carga del sistema. Desgraciadamente, la tendencia de un sistema que funciona simplemente según la maximización de la disipación de los recursos que utiliza equivale a la maximización de la función de utilidad de los operadores: nadie tiene el control, salvo la entidad abstracta que podemos llamar "codicia". Es como seguir la sugerencia de Sarah Palin en forma de "explota, pequeño, explota". En todos los campos, todo el mundo trata de ma-

ximizar la producción y el resultado es una economía de montaña rusa. Pero a veces la montaña rusa puede estrellarse contra el suelo cuando un recurso se explota a un nivel inferior a su capacidad de reconstruirse. En los sistemas biológicos, la extinción es para siempre.

Estos problemas se reconocen generalmente hoy en día, aunque no siempre se expresan de una forma que tenga en cuenta los factores dinámicos de rebasamiento y colapso. La forma de resolverlos ha sido normalmente hacer hincapié en el compromiso individual y la buena voluntad. Un buen ciudadano, se dice, participa en la lucha contra el cambio climático consumiendo menos y contaminando menos de lo que le impone la ley. Es una idea muy común: hay pocos debates sobre el cambio climático y la contaminación que no terminen con una breve lista de recomendaciones, como utilizar la bicicleta, apagar las luces cuando no se está en casa, comprar alimentos a productores locales, utilizar gomas naturales, etc. Ni siquiera es una idea nueva, los estoicos en la época de Séneca hacían lo mismo: frente a un terrible Gobierno dictatorial, que no podían controlar, hacían hincapié en la virtud personal y, sí, en el "estoicismo" frente a las inevitables adversidades.

Pero ¿puede la buena voluntad individual evitar la sobreexplotación de los recursos naturales? A pesar de todos los esfuerzos realizados hasta ahora, es difícil pensar que beberse una Coca-Cola sin utilizar una pajita de plástico vaya a hacer algo significativo para resolver nuestros problemas medioambientales. El problema es sencillo: la moderación de una persona es la oportunidad de otra. En otras palabras, una persona que es buena ecologista y decide ir al trabajo en bicicleta puede, simplemente, liberar recursos de combustible que una persona menos concienciada puede utilizar para ir al trabajo en un todoterreno. Es algo parecido, pero ligeramente diferente, a la paradoja de Jevons. Es lo que he llamado el "efecto colibrí" (Bardi, 2018). La idea procede de la vieja historia de un colibrí que intenta apagar un gigantesco incendio forestal llevando solo una gota de agua en el pico. Por supuesto, algo inútil contra un fuego, pero el colibrí está muy orgulloso de lo que hace y, en la historia, el pajarito es alabado por su voluntad de cumplir con su deber contra todo pronóstico. Parece que los humanos tienen una actitud similar: tienden a estar muy orgullosos de algunas contribuciones menores contra el calentamiento global que realizan, por ejemplo, no usar pajitas de plástico para su bebida, pero sí usar varias toneladas de combustibles fósiles para sus vacaciones de verano. Jean Baptiste Comby describió el problema en su libro

de 2015 La *question climatique (La cuestión del clima).* No utilizó la analogía del colibrí, pero argumentó que la cuestión del clima se ha despolitizado completamente y se ha relegado al ámbito de las decisiones individuales. Una forma de hacer que la gente se sienta bien, pero con poco o ningún impacto en el sistema.

Parece que se empieza a reconocer, hoy en día, que las acciones individuales son insuficientes para resolver los problemas a los que nos enfrentamos y evitar el inminente precipicio climático y de agotamiento. Esta es la razón de la aparición de movimientos políticos como la Rebelión contra la Extinción, que hacen hincapié en la acción colectiva. Una líder popular en este campo ha sido la joven activista sueca Greta Thunberg. Su acción está claramente enmarcada en términos colectivos: su mensaje rara vez incluye recomendaciones sobre acciones individuales como "no cojas un avión si puedes llegar en tren" (aunque también lo hace). Se dirige a los líderes pidiéndoles que hagan algo para garantizar que la gente de su generación tenga un futuro. Está claro en su mensaje que esta acción tendrá un coste que la mayoría de nosotros tendremos que pagar. ¿Se escuchará este mensaje o el movimiento ecologista seguirá jugando con las ventanas de doble cristal?

EL CONTROL DE LOS SISTEMAS COMPLEJOS: LA HISTORIA DE LA ÚLTIMA EMPERATRIZ ROMANA

La historia de Galla Placidia parece una novela de aventuras (Bardi, 2011). Nacida a finales del siglo IV de nuestra era, vivió la mayor parte de su vida durante el último siglo del Imperio romano de Occidente. En el año 410 era una joven princesa romana cuando fue secuestrada por los godos durante el saqueo de Roma. Sin inmutarse, se casó con su rey y se convirtió en su reina. A continuación, se produjeron acontecimientos más dramáticos: su marido, el rey de los godos, fue asesinado en una conspiración y Placidia regresó a tierras romanas, luchando contra su hermanastro, Honorio, por el trono imperial en la ciudad de Rávena, entonces capital del Imperio romano de Occidente. Derrotada, Placidia tuvo que huir, pero Honorio murió y ella regresó al frente de un ejército para retomar Rávena, mientras tanto, ocupada por un usurpador. Placidia derrotó al usurpador, lo capturó, le cortó la mano, lo hizo desfilar por la ciudad montado en un burro y finalmente lo hizo decapitar. En

el año 425 de la era cristiana, la victoriosa Placidia tomó para sí, en solitario, el título de augusta (venerable) que había pertenecido al primer emperador romano, Julio César, unos 500 años antes que ella.

Como ya he dicho, la historia de Placidia es una verdadera novela de aventuras y es extraño que a nadie se le haya ocurrido convertirla en una película. Al fin y al cabo, Placidia fue contemporánea de personajes tan conocidos como Atila el huno y (quizás) el rey Arturo de Gran Bretaña, ambos mucho más populares que ella en la ficción. Pero el interés por la vida y los hechos de Placidia no se limita a sus aventuras juveniles. Como emperatriz, nunca fue una simple muñeca con ropas caras. Más bien, fue posiblemente la última persona que gobernó realmente el Imperio: se enfrentó a enormes problemas pero consiguió mantenerlo unido. Tras su muerte, en el año 450 de la era cristiana, no quedó nadie que pudiera hacer lo mismo y el Imperio se desvaneció para siempre.

Me imagino que, en ocasiones, muchos de nosotros hemos soñado con ser lo que Placidia había conseguido ser: la gobernante absoluta del mundo. Estoy seguro de que todos tenemos en nuestra mente la receta perfecta para resolver los problemas del mundo: el hambre, las guerras, la contaminación, el calentamiento global y otros; seguramente funcionaría si solo tuviéramos el poder de imponer nuestras ideas como gobernantes benévolos y misericordiosos. Eso es solo un sueño, por supuesto, pero es cierto que los emperadores romanos eran gobernantes poderosos y semidivinos. Se decía que eran personas "nacidas en el púrpura", lo que indica que desde la infancia vestían ropas teñidas de púrpura fabricadas en Tiro, cuya producción era tan costosa que estaba reservada a los reyes y emperadores. Ahora, supongamos que tú fueras uno de esos emperadores vestidos de púrpura, ¿qué harías para salvar un imperio que se derrumba?

En general, el registro de la actuación de los emperadores romanos es terriblemente pobre. Todos conocemos al emperador Nerón, al que se acusó de haber incendiado Roma con el fin de encontrar la inspiración para una de sus canciones, y a Calígula, que nombró senador a su caballo y se dio a todo tipo de libertinajes. Probablemente, gran parte de estas acusaciones sean leyendas y propaganda, pero es cierto que los gobernantes absolutos suelen ser individuos psicológicamente inestables: pueden ser asesinos, depredadores sexuales, sádicos y cosas peores. Incluso cuando consiguen mantener un cierto nivel de cordura mental, la tarea de gestionar todo un Estado está más allá de

las capacidades de una sola persona. Para ser eficaces, los gobernantes necesitan personal competente que los informe y guíe en sus decisiones, pero tienden a rodearse de hombres aduladores, que amplían sus prejuicios y sus ideas erróneas. Los gobernantes absolutos no resuelven los problemas, sino que son *pro*blemas en sí mismos.

Curiosamente, parece haber una excepción a esta regla: Galla Placidia. Es posible que ella haya sido un caso raro de gobernante que comprendió lo que estaba mal en el sistema y actuó en consecuencia. En la época de Galla Placidia, el último siglo del Imperio romano de Occidente, el problema del Estado romano era principalmente financiero: con las minas de oro de España agotadas, el Imperio se había quedado sin dinero. En otras palabras, el Imperio se encontraba en plena sobrecarga financiera: gastaba más de lo que podía ganar. Los anteriores emperadores romanos habían tratado de llenar las arcas imperiales aumentando los impuestos, pero eso significaba forzar el sistema, haciéndolo más frágil. Cuanto más aumentaban los impuestos para gastarlos en más tropas, más pobre se volvía el Imperio, cada vez menos capaz de hacer frente a las invasiones bárbaras.

En cambio, Placidia hizo exactamente lo contrario. Por supuesto, no creía que las guerras fueran una buena forma de resolver los problemas del Imperio. Casiodoro (c. 485-c. 585) describió sus años de gobierno como de "demasiada paz", aunque su intención era la de hacer una crítica. Stewart Oost, que escribió la biografía de Placidia en 1969, informa de que promulgó dos leyes especialmente interesantes. Una prohibía a los col*oni, l*os campesinos ligados a la tierra, alistarse en el ejército. Esto privó al ejército de una de sus fuentes de recursos humanos y podemos imaginar que lo debilitó enormemente. La otra ley permitía a los grandes terratenientes gravar ellos mismos a sus súbditos. Esto privó a la Corte imperial de su principal fuente de ingresos y seguramente la obligó a reducir sus gastos. Estas dos leyes supusieron el empujón necesario para impulsar suavemente al Imperio hacia su siguiente etapa: su desaparición.

¿Entendía Placidia lo que estaba haciendo? Por supuesto, no tenemos forma de conocer los pensamientos íntimos de una persona que vivió un milenio y medio antes que nosotros y que no nos dejó nada escrito por ella misma, pero debió de estar impregnada de las formas de ver el mundo propias de la Antigüedad tardía en Europa, incluida una fuerte influencia de la filosofía

estoica. Además, había vivido con los godos, probablemente, sabía hablar su lengua y nunca renegó del título de reina que había conseguido con ellos. Es posible que esa experiencia le abriera la mente y le hiciera pensar de forma diferente a los estrechos puntos de vista que podemos imaginar típicos de un emperador o emperatriz enclaustrado o enclaustrada. Así, aplicó una estrategia consistente en no oponerse a lo inevitable. Placidia no trató de empujar al sistema en una dirección en la que no podía ir y desempeñó un papel fundamental en la apertura del camino para la llegada de la Edad Media.

Este exc*ursus en* la historia de Roma es una introducción al concepto de ‟control de sistemas complejos”. En general, las sociedades humanas, los seres vivos, los dispositivos fabricados por el hombre y otros tipos de sistemas complejos tienden a alcanzar un estado específico —a veces llamado ‟homeostasis”— y a mantenerlo. En algunos casos, esto es resultado de la interacción entre los mecanismos de retroalimentación internos del sistema, que tienden a equilibrarse entre sí. Un buen ejemplo es una bandada de pájaros. La bandada se mantiene unida gracias a las interacciones dominadas por la retroalimentación entre aves individuales. No tiene una estructura que podamos identificar como un sistema de control: ¡ningún ‟pájaro emperador” en la cima da órdenes a los demás pájaros!

En cambio, algunos sistemas complejos tienen estructuras dedicadas específicamente al control. El sistema nervioso y el cerebro de los vertebrados son un ejemplo evidente. Otro es un invento del siglo XIX que hizo posible el funcionamiento fiable de las máquinas de vapor: el ‟regulador de vapor”, una válvula automática para regular el flujo de vapor en la máquina. El regulador de vapor fue el precursor del concepto moderno de sistemas de control para nuestras máquinas y dispositivos: muchos son simplemente sistemas de punto de ajuste, como el termostato que regula la temperatura de una habitación. Otros pueden perseguir activamente un punto de ajuste en movimiento, como un cañón antiaéreo automático. Y algunos pueden ser muy complejos y adaptativos: piénsese en el mecanismo de control que mantiene estable un dron volador a pesar de las diversas maniobras que realiza. El último ejemplo de lo sofisticados que pueden llegar a ser estos sistemas es el coche autoconducido, tan de moda actualmente, que se espera que revolucione el transporte por carretera.

El regulador de vapor impresionó enormemente a los científicos del siglo

XIX por sus capacidades, que hasta entonces se consideraban propias de los seres vivos. Gracias a su sistema de control interno basado en la retroalimentación, se podía considerar que el regulador estaba dotado de un cierto grado de "inteligencia", reaccionando a los cambios de su entorno y adaptándose a las nuevas condiciones. Los seres vivos tienen capacidades similares: tu cuerpo, por ejemplo, es una maraña de sistemas de control basados en la retroalimentación. El nivel de azúcar en la sangre se controla mediante la síntesis de la hormona insulina. La temperatura del cuerpo se controla mediante mecanismos de retroalimentación neural operados por la glándula del hipotálamo, que también contiene sensores de temperatura. Y la presión arterial está controlada por un sistema llamado sistema renina-angiotensina-aldosterona (RAAS, por sus siglas en inglés). Todos estos sistemas pueden funcionar mal, por eso es posible que tengas que tomar pastillas para controlar la tensión arterial. O bien, el punto de ajuste puede variar en función de las circunstancias, como cuando tu temperatura corporal aumenta como respuesta a una infección: es lo que se llama "fiebre". El sistema de control más básico de tu cuerpo es el que impide que tus células crezcan y se reproduzcan a la mayor velocidad posible. Si ese sistema deja de funcionar, el resultado se denomina "cáncer".

Pero no todos los sistemas complejos tienen mecanismos de control que los mantengan en homeostasis. Por ejemplo, no hay un punto de ajuste para las poblaciones en los ecosistemas: las amebas en una placa de Petri se reproducen para aumentar su número lo más rápido posible y el total se mantiene controlado solo por la disponibilidad limitada de alimentos. No es diferente para las poblaciones de vertebrados: no hay límites establecidos, excepto el generado por la disponibilidad de alimento. Hay una lógica en todo esto: las criaturas individuales tienen puntos de ajuste y mecanismos de control internos porque eso les hace competir mejor por la supervivencia. Pero hay pocas o ninguna razón por la que estos mecanismos deberían haber evolucionado a nivel de grupo o de especie. Solo las especies "eusociales", las hormigas, por ejemplo, controlan activamente su población.

En el caso de las sociedades humanas, no parece que existan mecanismos de control biológico que limiten, por ejemplo, la población o la explotación de recursos. Pero también es cierto que somos una especie parcialmente eusocial y que hemos desarrollado mecanismos culturales que se supone que reducen la independencia individual en beneficio de la comunidad. Adoptan la forma de

leyes, religiones, normas sociales, etc. Muchas estructuras sociales humanas se basan en algún tipo de "unidad central de procesamiento" que puede recibir varios nombres: jefe, comandante, rey, emperador o, más sencillamente, "Gobierno".

Los Gobiernos tienen muchos propósitos, pero la impresión general es que existen principalmente para acosar a sus ciudadanos con más y más impuestos para mantenerse. Aparte de eso, a lo largo de la historia, los Gobiernos han tendido a justificar su existencia en términos de defensa de sus ciudadanos frente a amenazas (a veces reales): delincuencia, terrorismo, invasiones extranjeras y similares. Solo en tiempos relativamente recientes, se ha convertido en un lugar común creer que el Gobierno tenía que intervenir en la economía de otra manera que no fuera la simple emisión de moneda. Un punto de vista extremo en este campo es que todos los medios de producción deberían ser propiedad del Estado y estar controlados por el Gobierno para evitar el despilfarro que genera la competencia entre los distintos productores. Este punto de vista es típico del socialismo, pero hoy en día se ha abandonado en gran medida. Sin embargo, todavía se cree que cuando la economía no funciona como debería, el Gobierno debe hacer algo.

Pero ¿qué debería hacer exactamente un Gobierno? Los asuntos financieros son el área más debatida de la acción gubernamental y pueden verse como intentos de controlar el sistema actuando, por ejemplo, sobre el tipo de interés. El problema es que aquí, como en otros sectores, el Gobierno no suele intentar controlar la economía en el sentido de estabilizarla. Más bien, trata de hacer todo lo posible para que crezca a la mayor velocidad posible. Para la mayoría de la gente, se supone que esto es lo más obvio, pero puede no ser una idea tan inteligente. Es como si se accionara el regulador de una máquina de vapor para abrir la válvula lo máximo posible, todo el tiempo. Eso podría llevar a la máquina a revolucionar por encima de sus límites y tal vez incluso a explotar.

Ya vimos anteriormente que el intento de mantener el flujo de recursos naturales en crecimiento, el enfoque de "perfora, pequeño, perfora", tiene consecuencias similares. Hace que el sistema entre en sobregiro y luego lo hace colapsar generando lo que aquí llamamos el "precipicio de Séneca". Los operadores individuales o las empresas individuales son perfectamente capaces de generar un colapso por la sobreexplotación de los recursos, pero es un efecto especialmente destructivo cuando varios operadores o empresas

compiten por el mismo recurso. En ese caso, el operador que se muestra comedido y trata de evitar entrar en sobreexplotación simplemente dejaría más del recurso a otro operador menos escrupuloso.

Fue un biólogo, Garret Hardin (1915-2003), quien señaló por primera vez que la economía estaba sometida a este problema cuando publicó un famoso artículo en Sci*ence en* 1968, titulado "La tragedia de los comunes". El modelo de Hardin es el mismo que el de Lotka y Volterra que vimos anteriormente en este libro, salvo que se expresaba con palabras en lugar de utilizar ecuaciones diferenciales. Hardin propuso un modelo basado en un hipotético pasto que se considera un "bien común", es decir, de libre uso para todos, al que pueden llevar sus ovejas varios pastores. Los pastores tenderán a aumentar el tamaño de sus rebaños para incrementar sus ganancias y eso provocará un sobrepastoreo. Es decir, la hierba será consumida por las ovejas más rápido de lo que puede volver a crecer; las ovejas morirán de hambre y los pastores verán el colapso de sus rebaños. Y ahí viene el precipicio de Séneca. Hay pocas pruebas de que la tragedia de los comunes de Hardin tenga lugar realmente en los pastos (Ostrom, 1990). Pero más tarde se descubrió que el modelo de Hardin sí describe algunos sistemas económicos, como el de la pesca (Perissi et *al.,* 2017), tal y como habían demostrado antes los estudios de Volterra (1926). Hardin había identificado lo que hoy llamamos el "problema del rebasamiento" y el "colapso", aunque no utilizó estos términos en sus documentos. Sus ideas fueron revolucionarias en el sentido de que mostraban que en algunas condiciones, los sistemas económicos no *tie*nden a alcanzar la situación de estabilidad que la teoría del equilibrio general supone cuando se los deja solos en condiciones de mercados libres "perfectos". El modelo de Hardin fue muy discutido y a menudo rechazado, pero ha perdurado en el debate sobre cómo gestionar la economía.

Paralelamente a las consideraciones de Hardin, la cuestión del rebasamiento y el colapso se examinaba dentro de los nuevos enfoques de los sistemas complejos. Jay Forrester, fundador de la dinámica de sistemas, fue probablemente el primero en utilizar esta terminología, al observar que los sistemas económicos y biológicos tienden a comportarse como los circuitos electrónicos cuando "sobrepasan" la señal y luego "vuelven" con una serie de oscilaciones amortiguadas (Forrester, 1971). Esto llevó a Forrester a realizar el primer estudio dinámico del sistema económico mundial, Din*ámica mundial,*

*p*ublicado en 1971, y a sus colaboradores a realizar el otro estudio de referencia, Los *límites del crecimiento, d*e 1972. Estos estudios fueron más allá de los hipotéticos pastos que Hardin había utilizado como metáfora y usaron datos del mundo real para estudiar la economía mundial. El resultado fue que la economía mundial estaba —o pronto estaría— en sobregiro y que tendría que volver a estar por debajo de la capacidad de carga del sistema mundial. Este retorno sería, como mínimo, doloroso. Ni Forrester ni los autores de Los *límites del crecimiento uti*lizaron el término "colapso de Séneca", pero eso fue lo que identificaron por primera vez en la historia de la modelización dinámica.

Forrester y los autores de Los *límites del crecimiento no* se limitaron a reconocer el problema, sino que propusieron soluciones para él. Si se quiere evitar la sobreexplotación de un recurso natural, hay que regular su flujo para que el rendimiento de la explotación no supere la capacidad de carga del sistema (Meadows, 1999). Ambos estudios mostraron que el fenómeno del sobregiro y el colapso podría evitarse poniendo frenos a algunos de los principales elementos del sistema económico: habría que frenar la explotación de los recursos naturales, detener el crecimiento de la población humana y dedicar una cantidad creciente de recursos a la lucha contra la contaminación. El resultado de la aplicación de estas políticas sería que la economía mundial no se dispararía y se colapsaría, sino que alcanzaría un estado estable que podría mantenerse al menos durante el siglo XXI.

Estos resultados se obtuvieron considerando el conjunto de la economía mundial, pero son válidos también para economías más pequeñas a nivel de estados individuales. Los autores tampoco especificaron exactamente qué tipo de entidad debería aplicar las políticas de estabilización propuestas, pero parece obvio que solo podría haber sido alguna forma de Gobierno. Básicamente, para evitar los desastrosos fenómenos de rebasamiento y colapso se requería que el Gobierno operara de una manera no tan diferente a la del controlador de una máquina de vapor (y, de hecho, ¡su nombre es casi el mismo!). Un controlador regula la velocidad de rotación de la máquina hasta un punto de ajuste predefinido, evitando que funcione tan rápido y que pueda dañarse. Un Gobierno debería hacer lo mismo, regulando el flujo de recursos naturales en la economía y gestionando la producción de tal manera que el "motor" —o toda la sociedad— funcione sin problemas, evitando la trampa de

la sobreexplotación.

Pero aquí tenemos un problema. Mientras que los reguladores centrífugos tienen un excelente historial de capacidad para controlar las máquinas de vapor, los Gobiernos no gozan de la misma buena reputación. Si alguna vez has intentado presionar a tu Gobierno para que haga algo sensato que beneficie a todo el mundo, entiendes lo que parece ser una regla general, un Gobierno no es nada parecido a un termostato o al regulador de una máquina de vapor, es, más bien, la encarnación del concepto de la tragedia de los comunes descrita por Hardin, con todos los actores (lob*bies) p*resionando para coger lo que pueden, cuando pueden, para ellos mismos.

Hoy en día, en Occidente tendemos a creer que la democracia liberal es el mejor sistema de gobierno y, sin duda, tiene varios puntos buenos. Pero es claramente incapaz de evitar la sobreexplotación de los bienes comunes. Parece ser una característica incorporada: en una democracia, un político que aplica leyes que exigen a los ciudadanos hacer sacrificios para reducir su consumo no es reelegido. El resultado es que no hay ningún líder occidental, en la actualidad, que pueda permitirse declarar que el crecimiento económico puede no ser la única forma de llevarnos hacia el nirvana del crecimiento eterno: el mejor de los mundos posibles.

Tal vez la democracia no sea una gran idea, seguramente no tan buena como para que merezca la pena exportarla mediante el bombardeo aéreo de los desafortunados que no la tienen. Entre otros, el concepto de que necesitamos diferentes sistemas políticos ha sido expresado por Jorgen Randers (Confino, 2015), uno de los autores del primer informe sobre Los *límites del crecimiento (Me*adows et *al*., 1972). Randers no aboga por la dictadura, pero cree que deberíamos aprender de China cómo un Gobierno debe actuar con fuerza cuando sea necesario, incluso contra la oposición de la población. La política de "un solo hijo" promulgada por el Gobierno chino a partir de 1979 es un raro ejemplo de una cuota impuesta con éxito por un Gobierno.

La creciente opinión de que la democracia es incapaz de enfrentarse a los retos que se avecinan puede ser un factor que influya en la tendencia a la aparición de Gobiernos más autoritarios en Occidente, a menudo centrados en una única y poderosa figura a la cabeza. Sin embargo, no parece que los nuevos grandes hombres en la cima lo estén haciendo mejor que las viejas democracias basadas en el parlamento en términos de protección del

ecosistema. Los casos de Jair Bolsonaro, presidente de Brasil, y de Donald Trump, presidente de Estados Unidos, son una clara evidencia de esta tendencia: ambos están muy centrados en promover el crecimiento económico y se dedican a desmantelar las normas de protección del ecosistema concebidas por los Gobiernos anteriores. Algunos líderes, como Emmanuel Macron en Francia, dicen estar a favor de las políticas medioambientales, pero en realidad, parece ser principalmente un barniz "verde" pintado sobre un enfoque tradicional. En la práctica, los Gobiernos del mundo siguen participando en sus tradicionales juegos de poder, compitiendo en términos de esferas de influencia y, ocasionalmente, librando guerras entre sí. Nadie parece entender que el problema, hoy en día, no es el de ampliar las fronteras de su país, sino el de asegurar la supervivencia física de sus ciudadanos frente a acontecimientos potencialmente desastrosos relacionados con el cambio climático y el colapso del ecosistema.

Tan malo es el historial de muchos Gobiernos hoy en día que algunas personas han llegado a la conclusión de que el único Gobierno bueno es no tenerlo (al igual que el único indio bueno era el que no era indio, según la opinión de algunos estadounidenses del siglo XIX). Uno de los resultados es el libertarismo extremo de algunos sectores de la derecha política en Estados Unidos, de donde proviene la idea de que el sistema económico debe dejarse absoluta y completamente libre para regularse a sí mismo. Pero si esa es la solución, ¿cómo evitar la tragedia de los bienes comunes? La respuesta libertaria a la pregunta es la privatización. Si cada agente económico posee una parte del recurso que se explota, no tendrá ningún interés en sobreexplotarlo. Se ha sugerido que la ola de privatizaciones que barrió el mundo durante las últimas décadas fue un resultado directo de las ideas de Hardin o, al menos, de cómo se entendieron en algunos sectores políticos (Mattei, 2011) (pero nótese que el propio Hardin nunca abogó por la privatización).

A primera vista, privatizar los bienes comunes parece una buena idea. Sin duda, la avaricia es una fuerza poderosa que determina el comportamiento de las personas, así que ¿por qué no explotarla para evitar el exceso? Pero las cosas no son tan sencillas. Uno de los problemas es que la gente puede sobreexplotar los recursos que controla por completo, como se desprende de una serie de estudios realizados por Erwin Moxnes (2000) que muestran que la gente juzga fácilmente mal la cantidad de recursos disponibles y la capacidad del sistema para recuperarse después de haber sido perturbado. Jay Forrester

también examinó este problema con el modelo que denominó el "juego de la cerveza", en el que mostraba que los gestores pueden perder por completo el control de un sistema incluso cuando tienen los datos adecuados y toda la capacidad de actuar sobre ellos (Hieber y Hartel, 2003). Puede que esto no sea un problema crítico: la gente comete errores, pero también puede aprender de ellos. El verdadero problema de la idea de privatizar los bienes comunes es que esto no significa que no se necesite un Gobierno. Para los occidentales de clase media, la propiedad privada puede parecer una característica obvia de su mundo: esperan que sus Gobiernos garanticen sus derechos de propiedad. Pero esto no es cierto en muchas zonas del mundo donde la gente corriente está sometida a ser desalojada, despojada o algo peor. Hay una larga serie de casos en la historia de pueblos enteros expulsados de tierras que creían poseer; el caso clásico es el de los indios americanos en el siglo XIX. Y en todas partes, antiguamente, los derechos de propiedad no estaban garantizados por nadie, salvo por la capacidad del propietario de defenderla con las armas. Pero esa no es una buena manera de organizar la explotación de los recursos naturales. En cualquier caso, invita a los actores más poderosos del juego económico a comportarse como piratas, utilizando la fuerza para despojar a los más débiles. Además, en muchos casos, la privatización es sencillamente imposible: por ejemplo, no se puede vallar el océano para evitar que los pescadores destruyan caladeros enteros. Más difícil aún sería utilizar esta estrategia para gestionar el cambio climático privatizando la atmósfera.

Así pues, parece que sí necesitamos algún tipo de Gobierno pero, si las formas actuales de democracia son incapaces de llevar a cabo la tarea de estabilizar la economía, ¿podríamos pensar en otros tipos de sistemas políticos? En el pasado se han propuesto muchas utopías ambiciosas, empezando por la Rep*ública de* Platón, escrita hacia el 380 a. C. Las ideas de Platón nunca se pusieron en práctica, pero durante los últimos siglos la tendencia a experimentar con nuevas teorías políticas parece haberse vuelto frenética. Tuvimos el socialismo, el comunismo, el fascismo, el nazismo y más ideologías que supuestamente estaban en la base de Gobiernos que podían adoptar formas como la monarquía, la aristocracia, la plutocracia, la oligarquía, la democracia, la teocracia, la tiranía y otras.

Los resultados han sido variables, en la mayoría de los casos muy malos. Parece que muchos movimientos revolucionarios comienzan con ideas nobles

y elevadas sobre cómo reformar el Gobierno y convertirlo en algo que funcione en nombre de "nosotros, el pueblo", como dice la Constitución de Estados Unidos. En la práctica, todos los sistemas políticos tienden a degenerar: pueden convertirse en cleptocracias ineficaces, dictaduras horribles u otras formas que solo crean miseria y desastres para todos. Y si crees que el capitalismo es el lobo feroz de la historia, solo tienes que pensar en cómo el Gobierno de la Unión Soviética destruyó el ecosistema del mar de Aral para entender que el comunismo, teóricamente la pesadilla del capitalismo, no es una solución para el problema de la sobreexplotación (al menos en la versión soviética).

¿Significa eso que estamos condenados a una serie eterna de ciclos de crecimiento y colapso, como experimentan los lobos y los zorros en el modelo simplificado de Lotka-Volterra? O, como en la visión budista, ¿podemos escapar del ciclo de la muerte y la reencarnación y alcanzar el nirvana de la sostenibilidad? Son preguntas difíciles, pero, como dijo Thomas Browne, ni siquiera la canción que cantaban las sirenas está exenta de conjeturas.

Una cosa es segura, que especular sobre los sistemas políticos puede ser peligroso. A lo largo de la historia, ha habido varios casos de personas que han intentado poner en práctica las especulaciones políticas de otros: el resultado ha sido el acaecimiento, a menudo, de grandes desastres, como todos sabemos. En cambio, puede que nos vaya mejor si buscamos ejemplos históricos de Gobiernos que sí lograron gestionar los combustibles sin tener que oprimir a sus ciudadanos (al menos no demasiado). Existe al menos un ejemplo de este tipo, el de Japón durante el periodo Edo, de 1603 a 1868. Dicho periodo también se conoce como Periodo Tokugawa y comenzó cuando el señor de la guerra Tokugawa Ieyasu consiguió acabar con la era de las guerras civiles (el sen*goku jidai) y* unificar Japón bajo un Gobierno militar llamado "baf*uku*", encabezado por un comandante en jefe llamado Shō*gun. E*s un periodo que, en Occidente, conocemos principalmente por las numerosas películas de samuráis que se enmarcan en ese periodo como escenario. Pero haber sido un campo de batalla para los maestros de la espada no es el principal motivo de interés del periodo Edo, sino que podemos examinarlo como un ejemplo relativamente reciente de una verdadera sociedad de "crecimiento cero".

No tenemos datos sobre el Japón de Edo que podamos comparar directamente con nuestro concepto moderno de "producto interior bruto",

como base de nuestra idea de crecimiento económico, pero sabemos que la economía japonesa era viva y crecía en términos de riqueza per cápita (Eng y Smith, 1976). Sorprendentemente, este crecimiento económico no se tradujo en un aumento de la población. Tras un periodo inicial de expansión, a partir de aproximadamente 1700, la población japonesa se estabilizó en un nivel de unos 26-27 millones de personas (Bardi, 2016), cifra que se mantuvo sin cambios hasta 1854, cuando el comodoro Perry utilizó sus "barcos negros" como herramientas de choque y pavor para obligar a Japón a salir de su aislamiento económico y reiniciar un periodo de expansión. También sabemos que la extensión de las tierras cultivadas en Japón no varió a lo largo de casi un siglo y medio, desde 1720 hasta 1874 (Oishi, 1977). Tenemos constancia de algunas hambrunas durante este periodo, pero parece que fueron escasas y estuvieron relacionadas con acontecimientos climáticos especiales, como las erupciones volcánicas. En general, podemos decir que durante unos dos siglos Japón era lo más parecido a una sociedad de "crecimiento cero" que podemos imaginar.

¿Cómo consiguió Japón alcanzar esta condición? Probablemente, la respuesta más sencilla es que los japoneses no tenían otra opción. Habían intentado la expansión militar bajo el liderazgo del señor de la guerra Toyotomi Hideyoshi, que lanzó dos ofensivas contra Corea en 1592 y en 1597, pero el esfuerzo no tuvo éxito y eso obligó a los japoneses a enfrentarse a la necesidad de vivir dentro de los límites de sus islas.

Pero ¿cómo se consiguió el crecimiento cero? En primer lugar, no parece que el Gobierno tuviera un plan para garantizar la sostenibilidad de la economía japonesa. Como la mayoría de los Gobiernos de la historia, el baf*uku est*aba interesado sobre todo en su propia supervivencia. Para ello, implantó un estricto control sobre todos los sectores de la sociedad japonesa mediante el sistema llamado "dan*ka*", que obligaba a cada familia japonesa a registrarse en el templo budista local (Tamamuro, 2009). La popular historia de los cuarenta y siete rōn*in, q*ue tuvo lugar en 1702, nos cuenta cómo el Gobierno manejó con mano dura todo intento de actuar al margen de las leyes: basta con observar que todos los "héroes" de la historia fueron obligados a cometer un suicidio ritual.

Hoy en día, definiríamos el baf*uku com*o una dictadura dura: era implacable con todo lo que percibía como una amenaza. Entre otras cosas, prohibió el

cristianismo, que se creía un instrumento de los extranjeros para afianzarse en Japón y, finalmente, dominarlo. Pero, sobre todo, el baf*uku se* dedicó a *j*ugar a lo que los japoneses describen con el dicho "el clavo que sobresale se clava". Intervino para asegurarse de que ninguna fuerza competidora, señores de la guerra, extranjeros o empresas comerciales se hicieran lo suficientemente fuertes como para amenazar al poder central.

Una dictadura, sin duda, pero hay que decir que el baf*uku ase*guró un entorno en el que el comercio y la artesanía podían desarrollarse y florecer. La agricultura podía proporcionar alimentos a toda la población y los japoneses desarrollaron una economía viva basada en el comercio a lo largo de las "cinco rutas" (gok*aidō) q*ue unían la capital, Edo, con las principales ciudades de las islas. Y Japón no era solo una tierra de guerreros y campesinos, también había gente a la que podríamos identificar con nuestro concepto de "clase media", comerciantes, artistas, artesanos y literatos. Vivían en un mundo sencillo, se vestían con simples kimonos de algodón, su única bebida era el sa*k*e y a donde quisieran ir, tenían que llegar por su propio pie. Sin embargo, parecían capaces de llevar una vida plena. Disfrutaban de la naturaleza, de la poesía, de la literatura, de la música y de la compañía mutua, basta pensar en la poesía de Matsuo Bas*hō (*1644-1694), aún conocida en todo el mundo. Una buena impresión visual de esa época es la delicada y hermosa película Mis*s Hokusai (20*16).

En cuanto a la gestión del ecosistema, Japón se vio obligado a desarrollar una economía autónoma que produjera lo que el sistema necesitaba con una importación mínima o nula del exterior, lo que hoy llamamos "economía circular" (Hosomi, 2015). Se alcanzó principalmente mediante un enfoque ascendente en el que el Gobierno no parece que intervino directamente. Gerald Marten (2005) describe cómo los japoneses se enfrentaron al reto de la deforestación durante el periodo Edo:

> Japón respondió a este reto medioambiental con un "vuelco positivo" desde el uso insostenible de los bosques hasta el sostenible, que comenzó alrededor de 1670 [...]. El papel central de las acciones catalizadoras y los circuitos de retroalimentación positiva que se refuerzan mutuamente, la comunidad local, la estimulación y facilitación externas, el dejar que la naturaleza y los procesos sociales naturales hagan su trabajo, los efectos de demostración, la coadaptación social y ecológica y el uso de la diversidad social y ecológica, y la memoria como recursos. Es difícil identificar con certeza el punto de inflexión inicial, pero parece derivarse de la tradición centenaria de cooperación entre los aldeanos para protegerse de lo bandidos,

asignar los campos de arroz y el agua de riego, y almacenar el arroz.

Estas tradiciones de colaboración y acuerdo afectaron a todos los sectores de la economía japonesa. Es fascinante leer los detalles de cómo se reutilizaba y reciclaba todo: velas, ropa, ollas, herramientas, escobas, paraguas y muchas más cosas (Greve, 2014). Obsérvese, también, que como el Gobierno tuvo que renunciar a las tentaciones de las aventuras militares en el extranjero, no tenía necesidad de carne de cañón ni motivos para empujar a la población a crecer. No parece que se hayan promulgado nunca políticas activas de control de la natalidad de arriba abajo, sino que la población japonesa parecía poder utilizar principalmente el control de la natalidad para mantener la población estable, aunque en algunos casos fue necesario recurrir al aborto o al infanticidio (Eng y Smith, 1976).

Aquí se puede ver un claro ejemplo de cómo un sistema complejo reacciona a las perturbaciones externas utilizando sus retroalimentaciones internas. El sistema pudo alcanzar la capacidad de sostenimiento solo porque era complejo y tenía los recursos y los mecanismos para adaptarse. Probablemente, no habría funcionado tan bien, o tal vez no habría funcionado en absoluto, si hubiera sido impuesto por el Gobierno desde arriba. Y nótese que los campesinos japoneses hacían exactamente lo mismo que sus homólogos europeos para gestionar sus bienes comunes: una maraña de normas, costumbres, prácticas culturales y buena voluntad colectiva generaban una situación en la que nadie podía sobreexplotar los bienes comunes en el sentido que había descrito Hardin. No era por los castigos legales, ni por las vallas: era porque nadie podía permitirse el lujo de posicionarse solo contra toda la comunidad.

Todo esto no pretende ofrecer un modelo de lo que deberíamos hacer en el futuro. La cultura Edo fue característica de un periodo y una zona específicos, y obviamente nunca podríamos recrear el Japón de Edo en el mundo moderno, aunque estuviéramos convencidos de que merece la pena hacerlo. Discutir esa época es, principalmente, una demostración de viabilidad. La experiencia de Edo demuestra que era posible crear una sociedad que prosperase durante dos siglos o más en condiciones de crecimiento cero y sostenibilidad. Fue, en varios aspectos, una dictadura brutal, pero también fue una cultura sofisticada y refinada que alcanzó, entre otras cosas, niveles de alfabetización superiores a los de la sociedad europea de la época. Obsérvese que el sistema estaba

perfectamente estructurado y optimizado: no era puramente ascendente ni puramente descendente. El Gobierno garantizaba la estabilidad mediante una gestión descendente, el pueblo garantizaba la flexibilidad mediante una gestión ascendente. No era necesario un gran hermano para microgestionar los bienes comunes ni tampoco era un paraíso libertario para todos. Era una máquina que había alcanzado las condiciones de "criticalidad autoorganizada" de las que hablamos en un capítulo anterior de este libro.

Si Japón pudo alcanzar la estabilidad económica, significa que es posible hacerlo en otras condiciones, en diferentes culturas, tal vez incluso a nivel mundial. Lo que nos cuenta la historia del Japón de Edo coincide con lo que sabemos sobre los sistemas complejos: tienden a la estabilidad. En otras palabras, nuestra actual fijación en el crecimiento puede ser solo un capricho de la historia destinado a desaparecer en el futuro cuando nos veamos obligados a vivir dentro de los límites del ecosistema de la Tierra. Pero hay una condición que necesitamos urgentemente para ello: la paz, como nos dice la experiencia de Edo.

Seguramente, alcanzar tal condición llevará tiempo y esfuerzos, y en la actualidad, tenemos poca o ninguna idea de qué tipo de sistema político podría gestionar los bienes comunes planetarios para el bien de toda la humanidad. Lo más probable es que tengamos que pasar por una especie de "cuello de botella de Séneca" antes de aprender a hacerlo, pero no es imposible alcanzar la sostenibilidad, sobre todo porque es algo inevitable.

EL REGRESO DESPUÉS DEL COLAPSO: EL REBOTE DE SÉNECA

Imagina Europa al comienzo del periodo que llamamos "Edad Media", más correctamente "Antigüedad tardía". En el año 650 d. C., la población europea se había reducido a unos 18 millones de personas (Durand, 1977), menos de la mitad de lo que había sido en la época de esplendor del Imperio romano y enormemente menor de lo que es hoy, unos 700 millones de personas. La Europa de aquella época era una región boscosa, casi vacía de gente, en la que no ocurría nada especialmente interesante, salvo las disputas de los caudillos locales. Nadie en aquella época podía imaginar que, en menos de un milenio, los descendientes de los habitantes de aquella atrasada península del continente euroasiático iniciarían el audaz intento de conquistar el mundo y

que, finalmente, lo conseguirían. A finales del siglo XIX, prácticamente todo el mundo estaba bajo el control directo o indirecto de los países europeos o de su vástago americano, los Estados Unidos. En algunos aspectos, la situación no ha cambiado mucho en la actualidad.

La explicación convencional del éxito europeo en la conquista del mundo tiene que ver con la "carga del hombre blanco", un término inventado por Rudyard Kipling en 1899. Según esta idea, la dominación europea era una especie de "destino manifiesto" generado por las cualidades genéticas o culturales superiores de los pueblos europeos, que resultaron ser más inteligentes, más laboriosos, mejor organizados y, en general, más eficientes que las poblaciones del resto del mundo, supuestamente perezosas, desorganizadas, incultas y presas de las supersticiones.

Seguramente, es halagador para los europeos pensar que son más inteligentes que los demás, pero también es una interpretación que no está respaldada por los datos: de hecho, Jared Diamond defiende lo contrario en su libro *Guns, Germs, and Steel* (1997). En realidad, cuando los no europeos tuvieron la oportunidad de enfrentarse a los europeos utilizando las mismas armas, la superioridad europea no estaba ni mucho menos asegurada. Algunos casos históricos son la batalla de Adwa en 1895, cuando las fuerzas etíopes destruyeron un contingente invasor italiano, y la batalla de Tsushima, en 1905, cuando una flota japonesa derrotó a una flota rusa durante la guerra ruso-japonesa de entre 1904 y 1905. En tiempos más recientes, tenemos el ejemplo de Vietnam, donde el poderoso Estados Unidos tuvo que admitir su derrota ante las fuerzas vietnamitas en 1975.

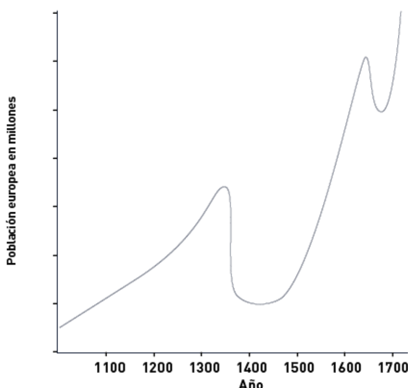
Pero estas fueron excepciones a la regla general que ve a los europeos dominando casi todo el mundo y la lista de las batallas y de las guerras ganadas por las fuerzas europeas o americanas contra las no europeas requeriría probablemente varias páginas. Entonces, ¿qué llevó a los europeos a tener tanto éxito? Sin pretender tener la explicación definitiva, creo que puedo proponer que no es una cuestión de factores genéticos o culturales, sino que fue causada por un fenómeno que yo llamo el "rebote de Séneca": el hecho de que una sociedad, un Estado o una organización pueda volver a crecer después del colapso a una velocidad más rápida que antes de este. En este caso, Europa puede haber obtenido una ventaja decisiva en un periodo histórico específico debido a una combinación de factores geográficos e históricos que hicieron

que su población "repuntara" en el momento adecuado. Sucedió cuando las tecnologías necesarias para expandirse por todo el mundo se habían desarrollado y podían utilizarse con ese fin.

Un rebote es algo que viene después del colapso y no hay duda de que Europa ha conocido colapsos económicos y poblacionales a lo largo de su larga historia. Hay pruebas de un primer colapso europeo que tuvo lugar durante el Neolítico, en el quinto milenio antes de Cristo (Shennan et *al.*, 2013). Luego, por supuesto, está el colapso del Imperio romano de Occidente, que comenzó alrededor del siglo III de nuestra era. Avanzando en el tiempo, tenemos el terrible colapso de mediados del siglo XIV, cuando las hambrunas, las guerras y la epidemia de peste conocida como la "peste negra" acabaron con un porcentaje estimado del 30% al 50% de la población europea de la época (Durand, 1977). Hubo otro colapso a mediados del siglo XVII, en correspondencia con la "Pequeña Edad de Hielo", aunque menos pronunciado y menos destructivo que los anteriores.

Así, tenemos un total de cuatro grandes colapsos a lo largo de la historia europea y cada uno de ellos, hasta ahora, fue seguido de un repunte económico y de un rápido crecimiento de la población. No existen datos cuantitativos sobre los dos primeros repuntes, pero una impresión visual de los acontecimientos que tuvieron lugar durante el último milenio puede verse en un artículo de William Langer, publicado en 1964 (figura 26).

FIGURA 26
OBSÉRVESE QUE EL CRECIMIENTO ES MÁS RÁPIDO DESPUÉS DEL COLAPSO. ESTO ES LO QUE LLAMO EL 'REBOTE DE SÉNECA'



Fuente: William E. Langer (1964).

Estos son los datos: ¿cómo los explicamos? La primera pregunta que se

suele hacer es qué causó los colapsos, pero puede ser una pregunta mal planteada. Es típico de los sistemas complejos comportarse de forma compleja y eso puede generar una serie de efectos de retroalimentación que pueden tomarse erróneamente como la "causa" del colapso. Por ejemplo, el colapso neolítico de Europa vino acompañado de una invasión de nómadas (los yamnaya) (Kristiansen et *al.*, 2017) y todos sabemos que el Imperio romano vio su territorio arrasado por sucesivas oleadas de poblaciones bárbaras durante las últimas fases de su existencia. En ambos casos, las invasiones han sido propuestas como la causa del colapso, pero nótese que no se produjeron tales invasiones en correlación con los dos colapsos europeos posteriores, lo que justifica que pensemos que las invasiones anteriores fueron reacciones oportunistas a una sociedad ya debilitada.

A continuación, consideremos el cambio climático: es una causa típica señalada en el caso de los colapsos de las civilizaciones, pero sus efectos han sido descartados para el colapso del Neolítico (Shennan, et *al.*, 2013) y no se registraron cambios de temperatura significativos en correspondencia con el declive y el colapso del Imperio romano de Occidente (Buntgen et *al.*, 2011). En cambio, en el caso de los dos colapsos más recientes en Europa, hay pruebas de olas de frío que dañaron la agricultura, posiblemente generadas por erupciones volcánicas. Dicho esto, nos preguntamos: ¿es posible que el cambio climático haya causado estos colapsos? Es posible, pero, como siempre, los sistemas complejos desafían las interpretaciones simples en términos de causa y efecto. Tal vez, el descenso de la población fue generado por el enfriamiento atmosférico, pero también puede ser que el descenso de la población enfriara el clima como resultado de la reforestación, otro caso de retroalimentación reforzada en un sistema complejo. De hecho, los datos muestran un pequeño descenso de la concentración atmosférica de CO_2 en los siglos posteriores a la peste negra en Europa (Buntgen et *al.*, 2011), lo cual puede que contribuyera al enfriamiento. El efecto es más fuerte y claro en el caso del gran colapso de las poblaciones del Nuevo Mundo (Koch et *al.*, 2019), ocurrido en un periodo posterior. En general, parece que los colapsos europeos son sobre todo el resultado de retroalimentaciones generadas internamente en sociedades que crecían tan rápido que habían superado la capacidad de los recursos que explotaban para mantener el ritmo.

En cualquier caso, la cuestión no es tanto lo que causó los colapsos como la

recuperación notablemente rápida que los siguió: lo que yo llamo aquí el "rebote de Séneca". Las razones del rebote son razonablemente claras: la despoblación libera recursos que pueden ser explotados para una nueva fase de rápido crecimiento. Antes de la era de los combustibles fósiles, las sociedades tenían dos recursos naturales principales que explotar: el suelo fértil y los bosques. Ambos tienden a ser sobreexplotados: los bosques se talan más rápido de lo que los árboles pueden volver a crecer y el suelo fértil es erosionado y arrastrado al mar más rápido de lo que puede regenerarse. Esto provoca un declive de la agricultura y el resultado no es solo el fin del crecimiento de la población, sino un colapso ruinoso que se traduce en hambrunas y epidemias. La pérdida de ingresos procedentes de los bosques debilita al Estado y el resultado son guerras intestinas que también aceleran el colapso. Pero la desaparición de una gran fracción de la población libera tierras cultivadas para que los bosques vuelvan a crecer y eso regenera el suelo. Entonces, cuando la población empieza a crecer de nuevo, la población encuentra en los nuevos bosques una fuente casi prístina de madera y, una vez cortada, de suelo fértil. Los árboles proporcionan la madera para los barcos y el carbón vegetal hecho con la madera proporciona el material necesario para fabricar acero para las armas. El ciclo se reinicia y puede ir más rápido que el anterior porque la sociedad aún recuerda las estructuras sociales y las tecnologías del ciclo precedente.

Los ciclos de deforestación y reforestación son evidentes en Europa: tanto el Imperio romano como la sociedad medieval habían sobreexplotado gravemente sus bosques y la reforestación tras los colapsos liberó recursos que pudieron ser utilizados para que la población creciera y se expandiera más allá de las fronteras anteriores. El fenómeno no fue exclusivo de Europa pero, como siempre, el éxito es cuestión de tiempo, oportunidades y un poco de suerte. Los europeos se encontraron avanzando de nuevo, en un momento en el que disponían de las tecnologías adecuadas para expandirse por todo el mundo y mientras las demás civilizaciones, potencialmente competidoras, eran incapaces de detenerlos.

En el lado opuesto del Mediterráneo, la civilización árabe era social y tecnológicamente tan sofisticada como la europea, pero su clima no permitía que los bosques crecieran lo suficientemente rápido como para generar el mismo rebote visto en Europa. Las civilizaciones americanas que llamamos "precolombinas" tenían bosques, pero aún no habían desarrollado las

tecnologías del acero y de los barcos oceánicos, también carecían de caballos para el transporte y como arma militar. Los chinos, en cambio, tenían las tecnologías y también los bosques, y podrían haber luchado con Europa por el control del mundo. Durante los siglos XII y XIII, un brote de la misma peste que afectó a Europa provocó un descenso de la población china que fue seguido por la invasión mongola. Posteriormente, la economía china experimentó un repunte: la población volvió a crecer y la era de los "viajes del tesoro" comenzó a principios del siglo XIV, durante la dinastía Ming, con flotas de barcos que exploraban las tierras que rodeaban China. Pero la fase de exploración china se detuvo pronto cuando el Gobierno central prohibió todos los viajes oceánicos. Solo podemos preguntarnos qué habría pasado si el Gobierno chino hubiera seguido apoyando la exploración en ultramar. Tal vez Colón habría encontrado gente de habla china cuando desembarcó en el Nuevo Mundo. Pero así es la historia.

Durante la Edad Media, Europa, a diferencia de China, no tenía un Gobierno central, por lo que no se aplicaron frenos a la expansión militar de los Estados europeos, que competían entre sí para conquistar nuevas tierras. La primera fase de la expansión europea se produjo con las Cruzadas —la primera de ellas tuvo lugar en 1095—. Pero el verdadero impulso se produjo con el repunte, tras la peste negra, de mediados del siglo XIV: se denominó la "era de las exploraciones" y de ella sabemos que los europeos consiguieron expandirse por la mayor parte de América y África. Tras el último colapso, el que tuvo lugar a mediados del siglo XVII (Durand, 1977), se produjo otro estallido de crecimiento económico que dio paso a la era del carbón y, con ella, al periodo definido como la "era de la divergencia" por Kenneth Pomeranz en el libro que publicó en el año 2000, momento en el que Europa se convirtió realmente en la potencia mundial dominante. En estos momentos, Europa está nuevamente en declive, quizá haya una nueva fase de colapso y repunte en el futuro.

Estas consideraciones son cualitativas, pero es posible ver el rebote de Séneca como un motor que impulsa a las civilizaciones hacia adelante en ráfagas. Si este es el caso, ¿podemos esperar un rebote si la civilización mundial pasa por un nuevo colapso de Séneca en las próximas décadas? Si la historia anterior nos sirve de guía, podría ocurrir. Por supuesto, es posible que el próximo colapso sea tan grave que la humanidad nunca vuelva a la complejidad de civilización que logró crear durante los siglos XX y XXI. Por lo

que sabemos, los efectos de la destrucción que estamos causando en el ecosistema podrían provocar la extinción de los humanos, el colapso definitivo de Séneca. Pero un caso mucho más interesante, y también diría que más probable, es que el colapso que se avecina sea uno más de la serie de colapsos anteriores que afectaron a las civilizaciones humanas: podría dar lugar a un nuevo rebote. ¿Sería eso realmente posible en un mundo agotado, en cuanto a recursos minerales, y sometido a grandes daños en los ecosistemas?

Como hemos visto en los primeros capítulos de este libro, un sistema complejo es una entidad que vive de un flujo de energía. Una civilización necesita energía para sobrevivir y cuanta más energía pueda obtener, más compleja y estructurada podrá ser. El problema que examinamos aquí es si se puede mantener un flujo de energía suficiente para que la civilización conserve al menos algunas de las características que tiene en la actualidad, por ejemplo, el tratamiento y almacenamiento electrónico de la información, un Internet mundial, la automatización, la investigación científica, etc.

En la actualidad, nuestra civilización se mantiene gracias a un flujo de unos 18 TW de energía primaria, producida principalmente (alrededor del 85%) por la combustión de combustibles fósiles (Bardi, 2016). El resto proviene en parte de la fisión nuclear (aproximadamente el 6%) y de una mezcla de tecnologías renovables, como la hidroeléctrica, la fotovoltaica y la eólica, entre otras. Una civilización de complejidad comparable a la nuestra no puede existir sin acceso a un flujo de energía comparable. Los recursos que impulsaron a las civilizaciones antiguas, la madera y la energía animal, crearon sociedades notablemente sofisticadas, pero ninguna dotada del nivel tecnológico que hemos alcanzado. Así que la primera pregunta es ¿qué pasaría con las fuentes de energía actuales en caso de colapso del sistema económico mundial?

Podemos estar razonablemente seguros de que los combustibles fósiles no sobrevivirán al cuello de botella de Séneca. Los yacimientos de estos combustibles se han agotado gravemente debido a un par de siglos de explotación y en la actualidad solo es posible mantener la producción mediante tecnologías extremadamente sofisticadas y grandes aportaciones de capital financiero y humano. Una amplia crisis económica y social, unida a guerras y disturbios civiles, podría llevar fácilmente a la industria de los combustibles fósiles a una espiral de la que nunca podría salir. Sería el fin de la "era de los fósiles", al menos hasta que la Tierra consiga volver a crearlos,

pero eso llevaría millones de años.

La situación es aún más difícil para la energía nuclear. En primer lugar, la energía nuclear también se ve afectada por el agotamiento del mismo modo que la energía fósil. Los recursos minerales de alta concentración de uranio se han consumido en gran medida por la explotación del siglo XX y una futura civilización que intentara reiniciarse con reactores de fisión tendría que tener en cuenta la carencia de recursos de uranio baratos. Tal vez podrían utilizar nuestras ojivas nucleares abandonadas, pero es una propuesta dudosa, en el mejor de los casos. Podrían intentar pasar a la tecnología mucho más cara y compleja de los reactores "rápidos", capaces de producir material fósil a partir de isótopos no fósiles, pero también es una propuesta difícil, especialmente si se parte de cero. Otro problema, quizá peor, para la energía nuclear es que una central nuclear abandonada corre el grave riesgo de fundirse si pierde la refrigeración activa. Por lo general, el combustible se podría fundir debido a su radiactividad residual y la vasija del reactor podría acumular suficiente presión para hacer que explote, esparciendo material radiactivo por todas partes. Esto es lo que le ocurrió a uno de los reactores de Fukushima, afectado por el tsunami de 2011. En el caso de una ruptura prolongada de la estructura social, los reactores actuales —existen unos 500— corren el riesgo de fundirse, un desastre colectivo de consecuencias casi inimaginables. Incluso, si se puede evitar, los reactores nucleares siguen siendo vulnerables a la acción militar, el terrorismo o el sabotaje (Lovins y Lovins, 1982; Vittitoe, 1989). En caso de un gran colapso económico, con el consiguiente malestar social y estratégico, los reactores nucleares podrían convertirse en una gran carga más que en un activo, y los destruidos por la fusión seguirían siendo trampas radiactivas durante siglos, algo que difícilmente animaría a nuestros descendientes a volver a utilizar esta tecnología.

Las cosas se ven mucho mejor si examinamos la tercera pata del actual suministro de energía: las renovables. En todos los aspectos, las renovables son más resistentes que las tecnologías nucleares y fósiles. Las renovables no están sujetas al agotamiento del combustible, aunque, por supuesto, las plantas se desgastan y deben ser reemplazadas periódicamente. Pero la mayoría de los materiales utilizados en una planta renovable pueden ser reciclados y estas tecnologías necesitan pocos o ningún mineral raro. Los paneles fotovoltaicos (FV) solo utilizan silicio y aluminio, ambos muy abundantes en la corteza terrestre, además de trazas de otros minerales

comunes, entre ellos algo de plata, pero no es esencial para su funcionamiento (Solé et *al.*, 2018). Las plantas eólicas utilizan tierras raras para sus imanes pero, también en este caso, hay alternativas disponibles, ya que también es posible reciclar los materiales de una planta antigua para construir una nueva. Las plantas renovables también son duraderas. Una de las primeras plantas fotovoltaicas de Italia se instaló en 1984 y más de treinta años después, en 2016, seguía funcionando, habiendo perdido apenas un 10% de su eficiencia inicial (Bardi, 2016). Por supuesto, las partes electrónicas de una planta fotovoltaica deben ser reemplazadas a intervalos más cortos, pero incluso sin un inversor, los paneles pueden seguir proporcionando energía de corriente continua (CC), que es lo que se necesita, por ejemplo, para recargar las baterías.

En general, las plantas fotovoltaicas pueden soportar muchos daños y seguir funcionando. Personalmente, fui testigo del impacto de un tornado a una planta en Italia que la convirtió en algo que parecía la escena de una película de Mad *Max, c*on paneles rotos esparcidos por todas partes. Pero cuando el sol volvió a brillar, los paneles restantes, aunque dañados, seguían produciendo más del 50% de la energía que la planta había estado produciendo antes del desastre. La planta pudo repararse rápidamente y ahora funciona a plena potencia. La situación puede ser más difícil para la generación moderna de plantas eólicas: las altas torres eólicas pueden caer en condiciones de vientos excepcionalmente fuertes y, en ese caso, hay poco que se pueda hacer, salvo reconstruir la planta desde cero. En cambio, las centrales hidroeléctricas pueden durar mucho tiempo y son muy resistentes a los daños.

En general, es posible que la infraestructura renovable de un país sobreviva a una crisis que podría incluir grandes operaciones militares, disturbios civiles y colapsos del ecosistema. Nuestros descendientes podrían resurgir al otro lado del cuello de botella de Séneca confiando en estas plantas para producir energía eléctrica. Esta energía podría utilizarse para construir nuevas plantas que sustituyan a las antiguas a medida que se desgasten. La difusa leyenda de que las energías renovables necesitan la energía fósil para seguir funcionando es solo eso: una leyenda (Raugei et *al.*, 2017). A lo largo de su vida, las plantas renovables producen mucha más energía de la que se necesita para crear su reemplazo. Por tanto, sería posible que nuestros descendientes tuvieran un buen suministro de energía eléctrica utilizando las tecnologías

renovables que nuestra sociedad ha desarrollado.

Esto deja abierta la cuestión de los recursos minerales: una civilización futura no tendría los minerales baratos que la nuestra ha agotado. Sin embargo, nuestros descendientes dispondrían de grandes cantidades de minerales ya extraídos que podrían aprovechar de las ruinas de nuestra civilización. No es nada nuevo: durante la Edad Media, la gente buscaba piedra y metales en las ruinas romanas. De nuestros residuos, nuestros descendientes podrían obtener muchos metales de todo tipo y su población, probablemente más reducida, no necesitaría tanta cantidad como nosotros hoy en día. Eso sería suficiente para poner en marcha una nueva civilización.

Por supuesto, nuestras ruinas no podrían durar eternamente como fuentes de minerales: al igual que nosotros ya no explotamos las ruinas romanas, nuestros descendientes tendrían que encontrar nuevas fuentes. Como no tendrán los mismos minerales de alta calidad que nosotros, se verían limitados en cuanto a los recursos minerales que podrían utilizar, pero seguirían teniendo buenas estrategias para seguir adelante. Como digo en mi libro Ext*raído (20*14), la corteza terrestre contiene abundante silicio para dispositivos electrónicos y para paneles fotovoltaicos, muchos metales como el hierro, el titanio, el aluminio y el magnesio para aplicaciones estructurales y, por supuesto, mucho óxido de silicio para el vidrio y similares. Como conductores, el cobre, demasiado raro, tendría que ser sustituido por el aluminio. Otras tecnologías tendrían que ser rediseñadas para no utilizar nada o muy poco de los metales raros que utilizamos hoy en día, desde el galio para los semiconductores hasta las tierras raras para los materiales magnéticos. Sería un reto a largo plazo que, sin embargo, podría cumplirse, al menos en principio. No es necesario que la humanidad vuelva a la agricultura de subsistencia o a la caza y la recolección, aunque, por supuesto, se podría argumentar que se producirá e incluso que sería una buena idea.

Hay otra posibilidad que vale la pena discutir: ¿podría la humanidad minar los cuerpos espaciales para reemplazar los menguantes minerales de nuestro planeta? Esto sería enormemente caro y en muchos casos sería inútil aunque pudiéramos pagar el coste. Las concentraciones de elementos que llamamos "minerales" son una característica de los cuerpos geológicamente activos y solo conocemos uno de ellos: nuestra Tierra. No hay minerales en la Luna ni en los asteroides; tal vez, en Marte, pero no tenemos pruebas de ello, hasta

ahora. Por tanto, la explotación de cuerpos espaciales para traer minerales a la Tierra tiene poco sentido. Sin embargo, la idea puede tener lógica si cambiamos el mercado objetivo de la Tierra al espacio. Los asteroides son ricos en elementos como el hierro, el níquel, el aluminio, el titanio, el silicio e incluso el carbono y el agua en forma de hielo. Estos minerales no se encuentran en forma de menas, pero forman una fracción suficientemente grande de algunos asteroides como para que sea posible extraerlos y purificarlos. También hay que tener en cuenta que el espacio es rico en energía solar, que puede transformarse en energía eléctrica mediante paneles fotovoltaicos, y que en el espacio no hay que preocuparse por la contaminación. Por supuesto, montar una industria minera en el espacio es una tarea que nunca se ha intentado hasta ahora y las incógnitas son enormes. Una cosa está clara: no es una tarea para humanos. Los humanos no pueden vivir en el espacio a menos que lleven consigo equipos caros y complejos, y es extremadamente difícil protegerlos de la peligrosa radiación de alta energía (Lanzerotti, 2005). En cambio, el espacio es un buen lugar para los robots que pueden hacer las mismas cosas que los humanos de una manera mejor y más barata. Y estos robots podrían fabricarse, al menos en parte, con materiales obtenidos de los asteroides. Nuestros hijos-robot tienen la oportunidad de heredar el sistema solar y podrían construir una civilización completamente nueva basada en el silicio (Bardi, 2016).

El futuro es hermoso porque siempre está lleno de posibilidades y lo que hagamos ahora tendrá eco en la eternidad. Como dijo Séneca en una de sus cartas: "Todo nuevo comienzo viene del final de otro comienzo".

BIBLIOGRAFÍA

AKERSTROM, M. (2017): Tra*ición y traidores, N*ueva York, Routledge, https://bit.ly/3mXPIkI.

BARDI, U. (2008): "La máquina minera universal", The *Oil Drum: Europe, h*ttp://theoildrum.com/node/3451.

— (2011): "Química de un Imperio: la última emperatriz romana", Cas*sandra's Legacy, h*ttps://cassandralegacy.blogspot.com/.

— (2012): "La fusión fría y yo", Cas*sandra's Legacy, h*ttps://cassandralegacy.blogspot.com/.

— (2014): Ext*raído: cómo la búsqueda de recursos minerales está saqueando el planeta, V*ermont, Chelsea Green Publishing.

— (2016): "¿Qué futuro para el Antropoceno? Una interpretación biofísica", Bio*physical Economics and*

Resource Quality, vol. 1, p. 2.
— (2016): "El problema de la población: ¿debe el papa decir a la gente que deje de reproducirse como conejos?", Cas*sandra's Legacy*, https://cassandralegacy.blogspot.com/.
— (2016): "Pero ¿cuál es el rendimiento energético real de la energía fotovoltaica?", Cas*sandra's Legacy*, https://cassandralegacy.blogspot.com/.
— (2017): "Cuando las noticias falsas matan. Mata Hari, la espía que nunca fue. Quimeras", Cas*sandra's Legacy*, https://cassandralegacy.blogspot.com/.
— (2017): "Frente al oso climático: el dilema de Camper", Cas*sandra's Legacy*, https://cassandralegacy.blogspot.com/.
— (2018): "Perché il colibrì è l'animale più pericoloso che esista", Cas*sandra's Legacy*, https://cassandralegacy.blogspot.com/.
— (2018): "Las islas no se hunden: se demuestra que el cambio climático es un engaño", Cas*sandra's Legacy*, https://cassandralegacy.blogspot.com/.
— (2019): "El desastre del biodiésel: ¿por qué las malas ideas tienen siempre tanto éxito?", Cas*sandra's Legacy*, https://cassandralegacy.blogspot.com/.
BARDI, U. et *al.* (2016): "The Sower's way: a strategy to attain the energy transition", Int*ernational Journal of Heat and Technology*, vol. 34.
BARDINI, C. (1998): Sen*za carbone nell'età del vapore. Gli inizi dell'industrializzazione italiana*, Milán, Bruno Mondadori.
BERLINGUETTE, C. P. et *al.* (2019): "Revisando el caso frío de la fusión fría", Nat*ure*, vol. 570, pp. 45-51.
BERMAN, A. (2018): "Hechos alternativos sobre la OPEP & amp; esquisto de Estados Unidos desde el Wal*l Street Journal*", https://www.artberman.com.
BESCHLOSS, M. R. (2002): Los *conquistadores: Roosevelt, Truman y la destrucción de la Alemania de Hitler, 1941-1945*, Nueva York, Simon & Schuster.
BUNTGEN, U. et *al.* (2011): "2500 años de variabilidad climática europea y susceptibilidad humana", Sci*ence*, vol. 331, pp. 578-582.
CAMPBELL, C. J. y LAHERRÈRE, J. F. (1998): "El fin del petróleo barato", Sci*entific American*, vol. 278, nº 3.
CHEN, S. (2019): "¿El plan de China de utilizar un detonador de bomba nuclear para liberar gas de esquisto en Sichuan, una zona propensa a los terremotos, es una locura o es brillante?", Sou*th China Morning Post*.
COHEN, H. (1998): "Table of temperatures, power densities, luminosities by radius in the Sun", Contemporary Physics Education Project.
COMBY, J. (2015): "La Question climatique. Genèse et dépolitisation d'un problème public", Ope*n Edition Journals*, http://journals.openedition.org/sociologie.
CONFINO, J. (2015): "Es preferible dejar que el mundo se vaya al infierno", The *Guardian*.
DALY, H. E. (1977): Ste*ady-State Economics: The Economics of Biophysical Equilibrium and Moral Growth*, Nueva York, W. H. Freeman.
DEMETRION, D. (2019): "La industria del calamar de Japón en crisis en medio de un récord de bajas capturas", The *Telegraph*.
DIAMOND, I. (1997): Gun*s, Germs and Steel*, Londres, Norton.
DOCHERTY, G. y MACGREGOR, J. (2018): "Prolongando la agonía: cómo el est*ablishment an*gloamericano prolongó deliberadamente la Primera Guerra Mundial tres años y medio", Tri*ne Day*.
DOUGHTY, C. E.; WOLF, A. y FIELD, C. B. (2010): "Retroalimentación biofísica entre la extinción de la

megafauna del Pleistoceno y el clima: ¿el primer calentamiento global inducido por el hombre?", Geo*physical Research Letters,* vol. 37.

DURAND, J. D. (1977): "Estimaciones históricas de la población mundial: una evaluación", Pop*ulation and Development Review,* vol. 3, p. 253.

DYSON, F. J. (1960): "Search for artificial stellar sources of infrared radiation", Sci*ence,* vol. 131, pp. 1667-1668.

DYSON, G. (2019): "El fin de la infancia", Edge.

Eng, R. Y. y SMITH, T. C. (1976): "Peasant families and population control in eighteenth-century Japan", Jou*rnal of Interdisciplinary History,* vol. 6, p. 417.

ETTINGER, R. C. W. (2005): Man *into Superman: The Startling Potential of Human Evolution-and How to Be Part of It,* Palo Alto, Ria University Press.

FLEISCHMANN, M. y PONS, S. (1989): "Fusión nuclear del deuterio inducida electroquímicamente", Jou*rnal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry,* vol. 261, pp. 301-308.

FORRESTER, J. (1971): Din*ámica mundial,* Cambridge, Wright-Allen Press.

— (1971): "Counterintuitive behavior of social systems", Sim*ulation,* vol. 16, pp. 61-76.

GIAMPIETRO, M. y MAYUMI, K. (2009): The *Biofuel Delusion: The Fallacy of Large Scale Agro-Biofuels Production,* Londres, Earthscan.

GIARINI, O. y LAUBERGÉ, H. (1978): The *Diminishing Returns of Technology,* Oxford, Pergamon Press.

GOELLER, H. y WEINBERG, A. (1978): "La edad de la sustituibilidad: qué hacemos cuando se acaba el mercurio", Ame*rican Economic Review,* vol. 68, pp. 1-11.

GREVE, G. (2014): Reciclaje y reutilización, Edo-*La Edopedia.*

HARDIN, G. (1968): "La tragedia de los comunes", Sci*ence,* vol. 162, pp. 1243-1248.

HAWORTH, A. R.; SAGAN, S. D. y VALENTINO, B. A. (2019): "¿Qué piensan realmente los estadounidenses sobre el conflicto con Corea del Norte nuclear? La respuesta es a la vez tranquilizadora e inquietante", Bul*letin of the Atomic Scientists,* https://bit.ly/2Xqhsnd.

HAYNES, J. E. y KLEHR, H. (2000): Ven*ona: Decoding Soviet espionage in America (Nota Bene),* Yale, Yale University Press.

HEINLEIN, R. A. (1952): "¿A dónde?", Gal*axy,* vol. 3, pp. 13-22.

HIEBER, R. y HARTEL, I. (2003): "Impactos de las estrategias de pedidos de SCM evaluados mediante el enfoque del 'Juego de la Cerveza' basado en la simulación: el modelo, el concepto y las experiencias iniciales", Pro*duction Planning & Control,* vol. 14, pp. 122-134.

HOSOMI, M. (2015): "El periodo Edo creó la sociedad del ciclo del material sano", Cle*an Technologies and Environmental Policy,* vol. 17, p. 2091.

HOTELLING, H. (1931): "La economía de los recursos agotables", Jou*rnal of Political Economy,* vol. 39, pp. 137-175.

ITER (2018): "¿Qué es el ITER?", https://bit.ly/2N6DyCl.

JEVONS, W. S. (1866): The *Coal Question,* 2ª edición revisada, Londres, Macmillan and Co.

JORDAN ET *al.* (2019): "Examinar las tendencias a largo plazo en política y cultura a través del lenguaje de los líderes políticos y las instituciones culturales", Pro*ceedings of the National Academy of Sciences,* vol. 116, pp. 3476-3481.

KENCH, P. S.; MCLEAN, R. F. y NICHOL, S. L. (2005): "Nuevo modelo de evolución de los arrecifes e islas: Maldivas. Indian Ocean", Geo*logy,* vol. 33, nº 2, p. 145.

KOCH ET *al.* (2019): "Earth system impacts of the European arrival and great dying in the Americas after 1492", Qua*ternary Science Reviews,* vol. 207, pp. 13-36.

Kopp, C. (2006): "Consideraciones sobre las técnicas de engaño utilizadas en el *marketing político* y de productos", *Australian Information Warfare and Security Conference.*

Kristiansen, K. et *al.* (2017): "Reteorizando la movilidad y la formación de la cultura y el lenguaje entre la cultura de la cerámica Corded en Europa", *Antiquity,* vol. 91, pp. 334-347.

Kurzweil, R. (2005): *La Singularidad está cerca: When Humans Transcend Biology,* Nueva York, Viking.

Laherrère, J. (2000): "La curva de Hubbert: sus fortalezas y debilidades", *Oil & Gas Journal.*

Langer, W. L. (1964): "La muerte negra", *Scientific American,* vol. 210, pp. 114-121.

Lanzerotti, L. J. (2005): "High-energy solar particles and human exploration", *Space Weather,* vol. 3.

Lovins, A. B. y Lovins, H. L. (1982): *Brittle Power,* Atlanta, Brick House Publishing Company.

Marsh, C. (2013): "Paradigmas de armonía social y selección natural: Darwin, Kropotkin y la metateoría de la ayuda mutua", *Journal of Public Relations Research,* vol. 25, pp. 426-441.

Marten, G. (2005): "Puntos de inflexión medioambientales: un nuevo paradigma para restaurar la seguridad ecológica", *Policy Studies Journal,* vol. 20, pp. 75-87.

Mattei, U. (2011): *Beni comuni. Un manifesto,* Roma, Laterza.

Meadows, D. H. (1999): "Leverage points: places to intervene in a system", https://bit.ly/2Fk5GBE.

Meadows D. H. et *al.* (1972): *Los límites del crecimiento,* Nueva York, Universe Books.

Moxnes, E. (2000): "No solo la tragedia de los comunes: percepciones erróneas de la retroalimentación y las políticas de desarrollo sostenible", *System Dynamics Review,* vol. 16, pp. 325-348.

Myerson, R. B. (1997): *Teoría de los juegos: Analysis of Conflict,* Cambridge, Harvard University Press.

Nerem, R. S. et *al.* (2018): "Climate-change-driven accelerated sea-level rise detected in the altimeter era", *Proceedings of the National Academy of Sciences,* vol. 115, pp. 2022-2025.

Newman, W. I. y Sagan, C. (1981): "Civilizaciones galácticas: dinámica de poblaciones y difusión interestelar", *Icarus,* vol. 46, pp. 293-327.

Niccolai, J. (2015): "Intel retrasa el proceso de fabricación de chips de 10 nm hasta 2017, ralentizando la ley de Moore", *InfoWorld,* https://bit.ly/3zLWa6l.

Nordhaus, W. (1992): "Modelos letales", *Brookings Papers on Economic Activity,* vol. 2, pp. 1-59.

Oishi, S. (1977): "Edo Jidai", *Chuko Shinso,* vol. 476, https://bit.ly/3mQf1Wb.

O'Neill, G. K. (1974): "La colonización del espacio", *Physics Today,* vol. 27, pp. 32-40.

Oost, S. I. (1969): *Galla Placidia Augusta. A Biographical Essay,* Chicago, University of Chicago Press.

Ostrom, E. (1990): *Governing the commons: the evolution of institutions for collective action,* Cambridge, Cambridge University Press.

Perissi, I. et *al.* (2017): "Dynamic patterns of overexploitation in fisheries", *Ecological Modeling,* vol. 359, pp. 285-292.

Pomeranz, K. (2000): *La gran divergencia: China, Europe, and the Making of the Modern World Economy,* Princeton, Princeton University Press.

Poundstone, W. (1992): *El dilema del prisionero,* Nueva York, Doubleday.

Rapoport, A. y Chammah, A. M. (1970): *Prisoner's dilemma: a study in conflict and cooperation,* Michigan, University of Michigan Press.

Raugei, M. et *al.* (2017): "Retorno energético sobre la energía invertida (ERoEI) para sistemas solares fotovoltaicos en regiones de insolación moderada: una respuesta integral", *Energy Policy,* vol. 102.

Ristuccia, C. A. (1997): "1935 sanctions against Italy: would coal and crude oil have made a difference, Oxford, University of Oxford, Working Paper, https://bit.ly/3O07ksa.

Russel, S. (2017): *Slaughterbots,* https://bit.ly/3Qn9NP9.

s. a. (2008): Transcripción: El debate de la Vicepresidencia, The *New York Times,*

https://nyti.ms/3QsgJu6.

s. a. (2017): "Mientras el cambio climático amenaza a las islas, el presidente de Kiribati planea el desarrollo", CBS *News*, https://cbsn.ws/3aSzF51.

s. a. (2019): "La guerra de los drones", The *Bureau of Investigative Journalism*, https://bit.ly/3NTG9PM.

s. a. (2019): "El bisonte en los diarios", *Descubriendo a Lewis y Clark*, https://bit.ly/3tDmg7s.

s. a. (2020): "Odds of Dying", *Injury Facts*, https://bit.ly/3HsZ95b.

Saunders, H. D. (2000): "Una visión desde el lado macro: rebote, *backfire y* Khazzoom, *Brookes Energy Policy*.

Scott Baker, C. y Clapham, P. J. (2004): "Modelling the past and future of whales and whaling", *Trends in Ecology & Evolution*, vol. 19, pp. 365-371.

Shennan, S. et *al.* (2013): "El colapso regional de la población siguió al auge inicial de la agricultura en la Europa de mediados del Holoceno", *Nature Communications*, vol. 4, nº 2486.

Solé, J. et *al.* (2018): "Las transiciones renovables y la energía neta de los líquidos del petróleo: un estudio de escenarios", *Renew Energy*, vol. 116, pp. 258-271.

Solow, R. (1956): "El cambio técnico y la función de producción agregada", *Quarterly Journal of Economics*, vol. 70, pp. 65-94.

Suskind, R. (2004): "Faith, Certainty and the Presidency of George W. Bush", The *New York Times*.

Tainter, J. A. (2006): "Complejidad social y sostenibilidad", *Ecological Complexity*, vol. 3, pp. 91-103.

Tamamuro, F. (2009): "El desarrollo del sistema templo-parroquia", *Japanese Journal of Religious Studies*, vol. 36, pp. 11-26.

Tillerson, R. (2018): "Las sanciones 'realmente empiezan a perjudicar' a Corea del Norte", *Time*, http://time.com/5107417/tillerson-sanctions-north-korea/.

Unz, R. (2018): "American Pravda: nuestro mundo mortal de la política de posguerra", The *Unz Review*, https://bit.ly/3zHnpin.

Vidal, J. (2017): "'Necesitamos desarrollo': Maldivas cambia el enfoque de la amenaza climática al turismo", The *Guardian*.

Vittitoe, C. N. (1989): "¿Causó el PEM de gran altitud el incidente del alumbrado público de Hawái?", U. S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information, https://www.osti.gov/biblio/6151435.

Volterra, V. (1926): "Fluctuaciones en la abundancia de una especie considerada matemáticamente", *Nature*, vol. 118, pp. 558-560.

Warr, B. S. y Ayres, R. U. (2010): "Evidence of causality between the quantity and quality of energy consumption and economic growth", *Energy*, vol. 35, pp. 1688-1693.

5. CONCLUSIÓN. EL COLAPSO VISTO POR LA FILOSOFÍA ANTIGUA

Este libro partió de una frase escrita hace unos dos mil años por el filósofo romano Lucio Anneo Séneca, "la fortuna es de lento crecimiento, pero el camino a la ruina es rápido". Ahora que hemos llegado al final, podemos volver a Séneca y preguntarnos si seguimos aprendiendo algo de él y de la escuela de pensamiento a la que pertenecía, los estoicos.

Al igual que nosotros, Séneca y sus contemporáneos se enfrentaron a dificultades, alegrías, dolor, felicidad, éxitos y derrotas. Al igual que nosotros, trataron de encontrar alguna lógica en lo que ocurría a su alrededor y la encontraron en gran medida en una forma de pensar que todavía nos afecta. El estoicismo fue una escuela de pensamiento iniciada por un filósofo griego llamado Zenón a principios del siglo III a. C. Todavía, en la actualidad, hay personas que se definen como estoicas, seguidoras de esa escuela y, aunque no siempre se reconozca, el estoicismo afectó profundamente al cristianismo que, con el tiempo, lo sustituyó como forma de ver el mundo y como guía del comportamiento humano. También se pueden encontrar muchas similitudes entre el estoicismo y el pensamiento anterior de Confucio y Laozi: la moral, la justicia, el sentido del deber, el respeto a todo el mundo y los tres principios del taoísmo: compasión, frugalidad y humildad.

El estoicismo tiene un profundo atractivo para muchos de nosotros y aún podemos aprender algo de un antiguo filósofo romano que vivió en tiempos tan diferentes a los nuestros y, sin embargo, tan similares. Séneca vivió, luchó, hizo lo que pudo, no siempre comportándose al mismo nivel elevado de moralidad que recomendaba en sus escritos. Se inmiscuyó activamente en la política e incluso se le acusó de estar detrás de la operación financiera mal gestionada que provocó la revuelta de la reina Boudica en Inglaterra en el año 61 de la era cristiana, que estuvo a punto de destrozar el Imperio (Bardi, 2018). En la vejez, Séneca fue acusado de haber formado parte de una conspiración que pretendía destronar al emperador Nerón y sustituirlo por el propio Séneca. Nunca sabremos si la acusación tenía algún fundamento, probablemente solo fue la excusa de un emperador caprichoso que quería deshacerse de su antiguo mentor. En cualquier caso, Séneca murió valientemente suicidándose en el año 65 de la era cristiana, algo que se citó muchas veces en la historia como ejemplo de valor personal y sentido del deber. Seguramente, él experimentó personalmente lo que yo llamo en este libro el "colapso de Séneca".

Además de Séneca como figura pública, tenemos a Séneca el filósofo que

nos dejó un gran corpus de textos. Fue un hombre culto al que le gustaba explorar diversos campos del conocimiento, desde los fenómenos naturales hasta las normas morales. En este campo, nunca fue muy profundo como pensador, ni especialmente innovador. Para nosotros, gran parte de lo que escribió parece un poco artificial, incluso "barroco". Sin embargo, hay una fascinación en los escritos de Séneca que no podemos ignorar y que ha mantenido su popularidad durante casi dos mil años después de su muerte. Estaba impregnado del arte de la retórica, un arte que en la Antigüedad se entendía como lo que hoy llamamos "comunicación eficaz". Consistía en organizar los argumentos de uno de manera que fueran al mismo tiempo comprensibles y convincentes. En las obras de Séneca todavía se puede apreciar este enfoque: escribía como si estuviera hablando en un tribunal o en la Curia, la sede del Senado romano. Le gustaba intercalar su discurso con frases concisas diseñadas con el objetivo específico de quedar impresas en la mente del lector. Si los caracteres en negrita hubieran existido en la época de Séneca, estoy seguro de que los habría utilizado. Un ejemplo es "el camino a la ruina es rápido", que es el estribillo de este libro.

Del hombre, Lucio Séneca, poco se desprende de sus escritos. Sus sentimientos íntimos están siempre enturbiados por su retórica y se percibe claramente que no quiso abrir su alma al lector, como haría posteriormente Agustín de Hipona, quizá el primer autor occidental en hacerlo. Solo podemos imaginar vagamente los sentimientos de Séneca ante la agitación de su tiempo, en los momentos buenos y malos de su vida personal. Sin duda, tenía sus defectos y a veces sus exhortaciones morales nos suenan estridentes. Tal vez su serenidad era solo una máscara que ocultaba a un hombre atribulado, como proponía De la Rochefoucauld en sus Máx*imas de* 1665. O tal vez, Séneca fue realmente capaz de mantener la serenidad en sus tiempos difíciles. Su comportamiento en el momento de su muerte nos dice que era un hombre que podía enfrentarse a la desgracia poniendo una cara valiente.

Como todos los seres humanos, los estoicos tenían sus límites, pero creo que Séneca y otros como Epicteto y Marco Aurelio comprendieron un punto fundamental que la mayoría de sus contemporáneos olvidaron, al igual que nosotros lo olvidamos a menudo. Se trata de que los sistemas complejos se manejan mejor "siguiéndoles la corriente" en lugar de intentar forzarlos a tomar la forma que queremos. Esto, en realidad, puede empeorar las cosas,

como nos dijo otro filósofo de los tiempos modernos, Jay Forrester, cuando habló de "empujar las palancas en la dirección equivocada" (Meadows, 1999). Creo que podemos tomar otra frase del vasto corpus de Séneca para centrarnos en este concepto, cuando dice en la consolación a su madre Helvia (V) que: "Ningún hombre pierde nada por el ceño de la Fortuna a menos que haya sido engañado por sus sonrisas".

Al extraer citas de las obras de cualquier persona, siempre corremos el riesgo de simplificar o tergiversar el pensamiento de alguien. Pero en el caso de Séneca, creo que tiene sentido. Como he dicho, le gustaba intercalar en sus textos frases concisas que resumían sus puntos de vista. Así, creo que la frase anterior puede considerarse una interpretación compacta del concepto básico de cómo tratar los sistemas complejos (lo que yo llamo la "estrategia Séneca"). Lo que nos dice Séneca es que nunca hay que caer en la trampa de creer que como las cosas siempre han ido de una manera determinada, seguirán así. La fortuna nunca está garantizada y lo que sube tiende a bajar, especialmente si ha subido rápido y alto.

Por lo tanto, la estrategia Séneca consiste simplemente en comprender que hay muchas cosas que puedes hacer para que el mundo vaya hacia donde tú quieres que vaya. Si estás en el principio de la curva asimétrica de Séneca, el colapso aún no ha llegado y todavía tienes la oportunidad de frenar la subida y evitarla por completo. Si te encuentras en el punto más alto, el pico de Séneca, es demasiado tarde para evitar la trampa de Séneca, el precipicio que se avecina, pero debes saber que cuanto más te esfuerces por evitarlo, más empinado será. Y si ya te estás deslizando hacia abajo, poco más puedes hacer que dejarte llevar.

En este punto, puedo citar algo que otro filósofo estoico, el emperador Marco Aurelio, dijo aproximadamente un siglo después de Séneca, "lo que hacemos en la vida tiene eco en la eternidad", una frase tan impresionante que se repitió en una película moderna, Gla*diator, e*n 2000. Las caídas y las subidas son cosas temporales y, por muy fuerte que sea la caída, habrá un rebote y ese rebote dependerá de lo que hayas hecho durante la fase de crecimiento y de lo que hayas hecho antes de la caída: este es el sentido del "eco" en el futuro. Forma parte de los ciclos eternos de la vida del universo.

Al acercarnos a un momento crítico para toda nuestra civilización, debemos pensar en el futuro de la humanidad más que en el de nuestras existencias

individuales. Podemos ayudar a nuestros hijos y a los suyos a tener un futuro mejor actuando ahora de forma correcta: simplemente dejándoles algo de la generosidad que nuestro planeta nos ha entregado y que hemos desperdiciado tan estúpidamente hasta ahora. Lo que hagamos ahora por los que vendrán después de nosotros tendrá eco en la eternidad.

BIBLIOGRAFÍA

Bardi, U. (2018): "La reina y el filósofo: guerra, dinero y metales en la Gran Bretaña romana", Cas*sandra's Legacy*, *h*ttps://cassandralegacy.blogspot.com/.

Meadows, D. H. (1999): "Leverage points: Places to intervene in a system", https://bit.ly/3xQoakM.

RESUMEN: SEIS COSAS QUE DEBES SABER ANTES DEL COLAPSO

En esta última parte del libro, permíteme resumir los principales puntos de esta "guía para el colapso" en una forma de referencia compacta que espero que pueda serte útil.

1. El **colapso no es un error, es una característica (el efecto Séneca).** Hace unos 2.000 años, el filósofo romano Lucio Anneo Séneca señaló que el crecimiento es lento pero la ruina es rápida. Séneca no fue el primero en escribir sobre colapsos, pero probablemente fue el primero en reconocer que los colapsos son un hecho de la vida. Los colapsos ocurren todo el tiempo, en todas partes y a lo largo de tu vida es probable que experimentes al menos unos cuantos relativamente grandes: fenómenos naturales como huracanes, terremotos o maremotos. Es posible que veas derrumbarse grandes estructuras, edificios o puentes, y grandes colapsos financieros como el que tuvo lugar en 2008, así como guerras y violencia social. Y es posible que veas catástrofes personales a pequeña escala, como la pérdida de un trabajo o un divorcio. Puede que no te guste, pero es la forma en que funciona el universo.
2. El **colapso es rápido (el precipicio de Séneca).** Como señaló Séneca, se necesita poco tiempo para que una estructura grande y aparentemente sólida se deshaga por las costuras y se desmorone. Pensemos en el derrumbe de un castillo de naipes, o en el de las Torres Gemelas tras los atentados del 11-S, o incluso en derrumbes aparentemente lentos como el del Imperio romano de Occidente: la desaparición es siempre mucho más rápida que el crecimiento. Los colapsos son rápidos, es una de sus características: hay que tenerlo en cuenta a la hora de prepararse para lo peor.
3. El **colapso es a menudo inesperado (el pico de Séneca).** Rara vez el colapso te avisa con antelación y algunos colapsos son totalmente imprevisibles, los terremotos, por ejemplo. En otros casos, el crecimiento continuado antes del colapso puede adormecerte con una falsa sensación de seguridad, como le ocurrió más de una vez a la industria pesquera, cuando la población de peces se desplomó justo después de alcanzar un máximo histórico de producción (el "pico de

Séneca"). Pero si entiendes cómo y por qué se producen los colapsos, puedes al menos estar preparado para ellos y evitar sus peores efectos.

4. El **colapso es malo para ti (el cuello de botella de Séneca). Los** colapsos constituyen un asunto serio: destruyen cosas, matan personas, generan enfermedades, entristecen, hacen infelices y deprimen, y a veces son irreversibles. Sin embargo, en ocasiones son necesarios para reconducir una situación que era imposible de controlar y hay que aceptarlos como un hecho de la vida.
5. Hay **vida después del colapso (el rebote de Séneca). El** colapso no es más que un "punto de inflexión" de una condición a otra. No se puede volver atrás, pero se puede avanzar y lo que parece un desastre puede no ser más que el paso a una nueva condición que puede ser mejor que la anterior. Esto puede llamarse el "rebote de Séneca", una característica de la evolución de los sistemas complejos. Así, si pierdes tu trabajo, esto puede darte la oportunidad de buscar uno mejor; y si tu empresa se hunde, puedes empezar otra sin cometer los mismos errores que cometiste con la primera. Incluso las catástrofes, como los terremotos o los huracanes, pueden constituir una oportunidad para entender cuál es tu papel en la vida, además de darte la oportunidad de ayudar a tu familia y a tus vecinos.
6. Res**istirse al colapso no es una buena idea (la estrategia Séneca). El** colapso es la forma que utiliza el universo para deshacerse de lo viejo y dejar espacio a lo nuevo. Resistirse al colapso significa esforzarse por mantener vivo algo viejo: puede que lo consigas durante un tiempo, pero a menudo al precio de crear un colapso aún peor. A menudo, te aferras a tu trabajo, a tu matrimonio, a tus hábitos, como si tu vida dependiera de no perderlos, pero también sabes que, finalmente, nada puede durar para siempre. La estrategia Séneca consiste en dejar que la naturaleza siga su curso y que algo se vaya y desaparezca como debe. Si lo entiendes, los efectos perjudiciales de los colapsos pueden reducirse y, en algunos casos, incluso puedes sacar partido de ellos.

Índice